LA HERENCIA NEANDERTAL • CONSTANTES VITALES DE LA TIERRA

INVESTIGACION y CIENCIA

JUNIO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

COMPUTACION Y TRANSPORTE CUANTICOS

Ensayos clínicos

Enanas marrones

Manipulación del cerebro

00285
9 770210 136004



Junio de 2000 Número 285

SECCIONES



Portada: Chip Simons

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Pat Rawlings
7	T. Nakajima y S. Durrance (*izquierda*); S. Kulkarni, D. Golimowski y NASA (*derecha*)
8	T. Nakajima y S. Durrance (*izquierda*); Space Telescope Science Institute (*arriba, centro*); John Stauffer (*abajo, centro*); Observatorio Meridional Europeo (*derecha*)
9	Bryan Christie (*izquierda*); Laurie Grace (*derecha*)
10	Laurie Grace
11-13	Bryan Christie
16-22	Gabino Rubio Bollinger, Nicolás Agraït y Sebastián Vieira
24-25	Cortesía de la Biblioteca Beinecke, Universidad de Yale
26	George B. Dyson (*arriba*); Cortesía de Peabody Museum, Universidad de Harvard (*abajo*)
27	Roberto Osti
28	Cortesía de Special Collections, Univ. de Washington (*arriba*); cortesía de Baidarka Historical Society, Bellingham, Wash. (*centro*); George B. Dyson (*abajo*)
29	Cortesía de la Biblioteca Beinecke
30-31	Ann E. Yow (*arriba*); Roberto Osti (*dibujos*), según E. Y. Arima (*izquierda y centro*), E. T. Adney y H. I. Chapelle (*derecha*); Heritage Kayaks (*fotografía*)
44-45	Jana Brenning (*ilustración digital*); Photodisc (*laberinto*); Corbis (*lámpara*); Peter Murphy (*ratón*)
46-47	Peter Murphy
48	Terese Winslow
49	Terese Winslow (*arriba*); Peter Murphy (*abajo*)
51	Dusan Petricic
52-53	Del Brown (*arriba*); Dusan Petricic (*dibujos*), Heidi Noland (*abajo*)
54-55	Corbis
56-57	Universidad de Vermont (*arriba*); Heidi Noland (*abajo*)
59	Space Channel/Philip Saunders
60	Laurie Grace (*arriba*); David Fierstein (*abajo*)
61	Laurie Grace (*arriba, izquierda*); P. G. Kwiat y M. Reck (*derecha*)
62-63	L. Grace (*arriba*); David Fierstein (*abajo*)
64	Laurie Grace
65-66	Dusan Petricic
67	Laurie Grace
69	R. B. Husar
70	George Retseck (*ilustraciones de sensores Terra*); Laurie Grace (*iconos*)
71	Cortesía de Michael Abrams (*arriba*); Takmeng Wong NASA (*abajo*)
72	NCAR/Mopitt Team, Canadian Space Agency (*arriba*); cortesía de Shigeru Suzuki y Eric M. de Jong (*abajo*)
73	SeaWiFS Project, NASA
74	Museo de Historia Natural de Croacia
76	Erik Trinkaus (*arriba*); Archeologický Ústav AV ČR (*abajo*)
77	Michael Rothman
79	José Paulo B. Ruas
80-81	Cortesía de Dominique Baffier (*izquierda y derecha*), según "Les derniers Néandertaliens". La maison des Roches, 1999; Francesco D'Errico (*centro*)
82-83	Susan Carlson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

María Rosa Zapatero: *El descubrimiento de las enanas marrones*; Laureano Carbonell: *El kayac de las islas Aleutianas*; Esteban Santiago: *Ratones expertos*; M.ª José Báguena: *Naturaleza y alcance de los ensayos clínicos*; Juan Pedro Campos: *Teletransporte cuántico*; Carlos Lorenzo: *¿Quiénes fueron los neandertales?*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
ASSOCIATE EDITORS Timothy M. Beardsley y Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
CONTRIBUTING EDITORS Graham P. Collins; Marguerite Holloway y Paul Wallich
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

BOMBA DE HIDRÓGENO: DEFENSA CIVIL. «Las ciudades norteamericanas, con sus ingentes masas de población y sus expuestas plantas industriales, se ofrecen como blancos muy atractivos y muy vulnerables a este tipo de arma. Es evidente que si nuestras ciudades más extensas pudieran disgregarse en comunidades menores, el país adquiriría una posición mucho menos vulnerable. La cuestión inmediata a plantear es la del costo astronómico que ello supondría. Pero los urbanistas de hoy deben contemplar la dispersión a largo plazo. Las ciudades podrían construirse en forma lineal con una distancia de kilómetros entre extremos siguiendo un patrón de 'banda estrecha continua'.»

ANTIBIÓTICOS INDUSTRIALES. «La aureomicina, el antibiótico áureo, es más eficaz que las vitaminas en su fomento del crecimiento de los animales; hasta un 50 por ciento en pollos, cerdos y pavos. Los ensayos muestran que sólo 25 miligramos de aureomicina por kilogramo de pienso aumentan la tasa media de crecimiento del animal entre un diez y un quince por ciento. Se ha sugerido que la aureomicina podría ayudar a ese crecimiento porque ataca a los microorganismos perjudiciales del tracto intestinal.»

LA CONSPIRACIÓN DE LOS CRÉDULOS. «Crítica: '*Worlds in Collision*', de Immanuel Velikovsky, The MacMillan Company. Los científicos consideran que la teoría de Velikovsky de que hace 3500 años un enorme cometa detuvo temporalmente a la Tierra es uno de los más asombrosos engaños hasta ahora sufrido por el hombre crédulo. Los sociólogos harían bien en considerarlo sujeto de estudio sobre psicología de masas, no menos interesante que el famoso programa de radio 'Marte ataca' de Orson Welles. Al autor no parecen perturbarle esas opiniones.»



Algodón: nueva escuela laboral sureña, 1900

...cien años

¿QUÉ TRANSMITIR? «Mr. Richard Kerr ha exhibido ante la Real Sociedad de Londres su último sistema hertziano. Se trata de un reloj cuyos movimientos se controlan a distancia mediante telegrafía sin hilos. El inventor se propone ajustar simultáneamente todos los relojes londinenses mediante esa única máquina. Su ingenio podría actuar sobre todo reloj dotado de un receptor y sus manecillas se moverían a cualquier parte deseada de la esfera.»

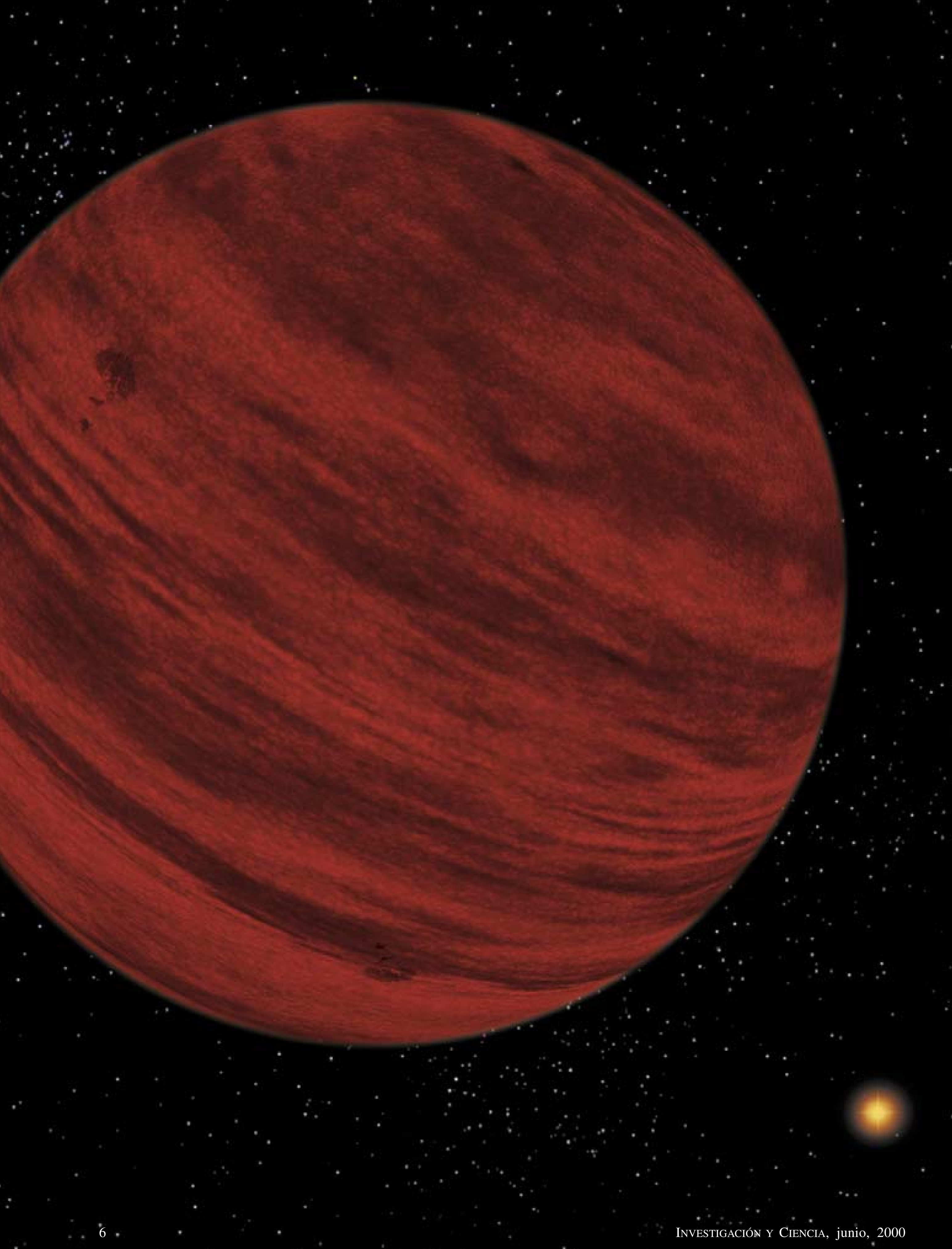
VIETNAM Y PESCADO. «Se estima en cinco millones el número de personas que en Anam [Vietnam Central] se alimentan de pescado, que abunda sobre todo en las provincias meridionales de Binh-Thuan y Khan-Hoa y en la norteña Thanh-Hoa. Esta última suministra pescado a los mercados de Tonkín y parte de China. Las dos primeras, dadas las numerosas bahías donde puede pescarse todo el año, abastecen a las plantas de salazón que sirven a Singapur y a Extremo Oriente.»

ESCUELAS DE HILATURA DEL ALGODÓN. «Los fabricantes del sur reconocen el fracaso del sistema de formar a los obreros en las plantas. La fábrica es un establecimiento cuyo fin es producir, no enseñar. La primera escuela laboral sureña del algodón está afiliada a la Escuela de Tecnología de Georgia, en Atlanta; el Instituto Clemson (Carolina del Sur) ha abierto también, hace poco, un departamento textil. Los planes de estudios de esas escuelas son tan amplios como su selección de maquinaria. Nuestra ilustración muestra a uno de los jóvenes aprendiendo de una hiladora continua.»

TRANSMITIR POTENCIA. «En la Exposición de París todos los motores de gran tamaño se emplean en accionar dinamos, afirma *The Engineer*, y éstas sirven para suministrar potencia a través de cables allá donde se desea. El 'motor de noria' ya no se ve y puede que esté dejando de existir en el Continente. En la Exposición no hay una correa ni una soga de arrastre. Ello prueba el favor con que en el Continente se considera la transmisión eléctrica.»

...ciento cincuenta años

MUNDO DE BURBUJAS. «Un gran pecado se propaga a escala nacional, el deseo desordenado de enriquecerse pronto y cada vez más. Como la riqueza es la única aristocracia en América, todos parecen fascinados por conseguir tal distinción. La 'prisa por enriquecerse' alienta el espíritu especulativo y los hombres se precipitan a la buena de Dios en ardides para adquirir una riqueza rápida. En consecuencia, en torno a nosotros revientan las pompas de jabón. Un hombre que amasa riqueza tan rápidamente no suele saber administrarla, mientras que su momentáneo éxito atrae a miles hacia los mismos ilusorios fines. ¿Qué puede ser peor para la sociedad que tales prácticas?»



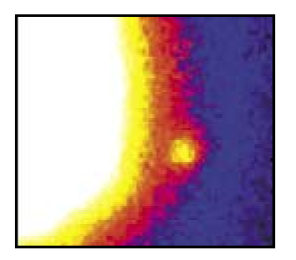
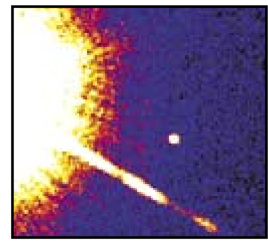
EL DESCUBRIMIENTO DE LAS ENANAS MARRONES

De menos masa que las estrellas, pero más que los planetas, las enanas marrones se reputaron antaño cuerpos celestes escasos. Las nuevas búsquedas realizadas en el cielo muestran, sin embargo, que nos hallamos ante objetos tan comunes como las estrellas

Gibor Basri

Una enana marrón es una estrella que se frustró. Las estrellas brillan en el cielo en virtud de las reacciones nucleares de su interior que liberan grandes cantidades de energía resultante de la fusión del hidrógeno en helio. Para que se desarrollen tales reacciones de fusión es necesario, sin embargo, superar un umbral de temperatura de unos 3 millones de kelvin en el núcleo de las estrellas. Y puesto que la temperatura del núcleo aumenta con la presión gravitatoria durante el proceso de formación, una estrella debe tener al menos una masa mínima para ser considerada como tal: aproximadamente unas 75 veces la masa del planeta Júpiter, vale decir, alrededor de un 7 % la masa de nuestro Sol. Las enanas marrones no cumplen esta propiedad; gozan de una masa mayor que la de los planetas gigantes gaseosos pero no hasta el punto de entrar en la categoría de estrella.

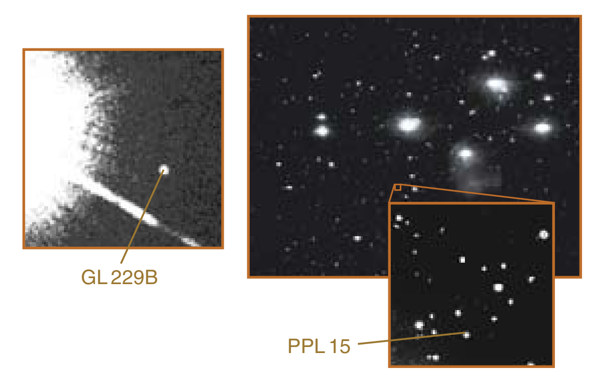
Durante decenios las enanas marrones fueron el "eslabón perdido" de los cuerpos celestes: aunque se creía en su existencia, nunca se habían observado. En 1963, Shiv Kumar, de la Universidad de Virginia, presentó su teoría según la cual el mismo proceso de contracción gravitatoria que da lugar a las estrellas, a partir de nubes de gas y polvo, podría también producir a menudo objetos de masa inferior. A tales cuerpos hipotéticos se les llamó estrellas negras o estrellas infrarrojas, antes de que Jill C. Tarter sugiriese la denominación "enana marrón", en 1975. (Jill C. Tarter es hoy directora de investigación del Instituto SETI en la californiana Mountain View.) Se trata, empero, de un nombre confundente, pues la enana marrón es un objeto de color rojo. Pero ya existía la expresión "enana roja", que designaba a las estrellas cuya masa no llegaba a la mitad de la solar.

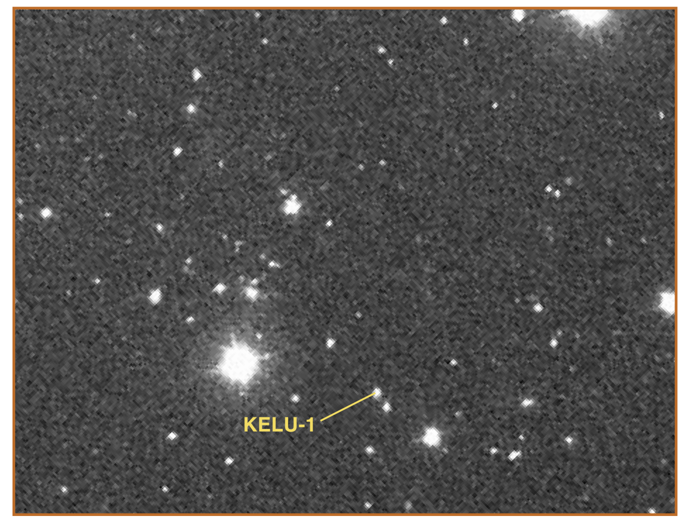



LA ENANA MARRON GLIESE 229B presenta un brillo rojo en la recreación artística precedente. Se le atribuye un tamaño 10 veces menor que el de Júpiter, pero su temperatura decuplica la de éste y le supera entre 30 y 40 veces en masa. Fue descubierta en 1995 como compañera de una estrella enana roja Gl 229A (*fondo*). Los astrónomos detectaron la enana marrón en las imágenes tomadas con el telescopio de 1,5 metros de diámetro de Monte Palomar (*recuadro de la izquierda*) y con el telescopio espacial Hubble (*recuadro de la derecha*); nos mostraron la presencia del objeto constituido en una pequeña y débil fuente de luz al lado de la enana roja. Gl 229B dista más de 6000 millones de kilómetros de su estrella compañera, es decir, más alejada de cuanto Plutón se encuentra con respecto al Sol.

Descubrimiento de enanas marrones

Métodos de búsqueda





PARA OBSERVAR A LOS OBJETOS DEBILES, así las enanas marrones, se necesitan estrategias especiales. Una consiste en apuntar los telescopios hacia los alrededores de estrellas conocidas y buscar la presencia de compañeros. Se trata del método seguido en el descubrimiento de Gl 229B (*arriba a la izquierda*). De acuerdo con otra técnica, la búsqueda se concentra en cúmulos recientes, ya que las enanas marrones brillan más en su juventud. Se cartografió el cúmulo de las Pléyades (*centro*), que cuenta con una edad de sólo 120 millones de años, para detectar PPl 15 así como un gran número de enanas marrones jóvenes. Se sigue una tercera estrategia para hallar enanas marrones "del campo", mediante la obtención de imágenes de grandes áreas de cielo con instrumentos que son sensibles a fuentes débiles y rojas. La identificación de la primera enana marrón del campo, Kelu 1 (*arriba a la derecha*), se anunció en 1997.

A mediados de los años ochenta, los astrónomos de todo el mundo comenzaron una intensa búsqueda de enanas marrones en el firmamento. No les acompañó la suerte. En 1995, por fin, se dio a conocer la primera prueba irrefutable de la existencia de dichos objetos. El descubrimiento abrió las compuertas. Desde entonces se han detectado docenas de enanas marrones. Hoy, la astronomía teórica y la de observación se cuestionan un rosario de preguntas del máximo interés. ¿Cuántas enanas marrones hay? ¿Cuál es el intervalo de masas en el que se pueden encontrar? ¿Existe un continuo de estos objetos desde las estrellas hasta la masa de Júpiter? ¿Se originan todos de la misma forma?

La búsqueda de enanas marrones fue un proceso largo y tedioso, ya que se trata de cuerpos celestes muy débiles. Todos los objetos astrofísicos (estrellas, planetas y enanas marrones) emiten luz durante sus etapas de formación en virtud de la energía que se libera con la contracción gravitatoria. En el caso de una estrella, el brillo originado por la contracción se sustituye en el curso de la evolución estelar por la radiación termonuclear resultante de la fusión del hidrógeno. Una vez que dicha fusión comienza, el tamaño y la luminosidad de la estrella permanecen constantes; en muchos casos, durante miles de millones de años. No ocurre así en la enana marrón; incapaz de mantener por sí misma la reacción nuclear del hidrógeno, su luz se debilita paulatinamente a medida que el objeto se va contrayendo. La luz emitida por las enanas marrones corresponde principalmente a la parte del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Puesto que hablamos de objetos intrínsecamente débiles desde su nacimiento y su luz se apaga con los años, algunos especularon con la posibilidad de que las enanas marrones formaran parte importante de la "materia oscura", una masa misteriosa e invisible que supera de largo la masa luminosa del universo.

GIBOR BASRI, profesor de astronomía de la Universidad de California en Berkeley, se doctoró en astrofísica por la de Colorado en Boulder en 1979. Entre sus campos de estudio destacan las estrellas de tipo solar, las estrellas de baja masa y la formación estelar.

Los astrónomos creían que el lugar apropiado para buscar objetos tan débiles sería en las proximidades de estrellas brillantes. Más de la mitad de las estrellas de nuestra galaxia se encuentran formando pareja con otras estrellas (sistemas binarios donde las dos componentes estelares orbitan alrededor del centro de gravedad común). Sospechaban así que muchas estrellas, aparentemente solitarias, podrían tener por compañera una enana marrón. En ese tipo de búsqueda no se requiere cubrir grandes áreas en el cielo; basta con apuntar el telescopio hacia estrellas ya conocidas. Lo que no deja de ser una ventaja.

Semejante estrategia se mostró acertada desde el principio. En 1984, los investigadores del Observatorio Steward, de la Universidad de Arizona, anunciaban el hallazgo de un posible compañero alrededor de VB8, una estrella de masa pequeña distante del sistema solar 21 años-luz. Por sus propiedades, el candidato debía ser una enana marrón; pero no pudo confirmarse su presencia en imágenes posteriores. (Resultó tratarse de un artefacto observacional; no era ningún objeto real.) El siguiente candidato probable fue anunciado en 1988: Eric Becklin y Benjamin Zuckerman, de la Universidad de California en Los

Angeles, informaron sobre el descubrimiento de GD 165B, un objeto débil y rojo compañero de una estrella enana blanca. No guardan las enanas blancas ninguna relación con las enanas marrones. Las enanas blancas son los cadáveres de estrellas de masa intermedia, tienen un tamaño reducido y son más calientes y pesadas que las enanas marrones. GD 165B podría tratarse de una enana marrón, pero los astrónomos no pudieron confirmarlo, dado que la masa que se obtiene para este objeto es muy próxima al límite de 75 veces la masa de Júpiter entre las estrellas menos masivas y las enanas marrones.

Otra ventaja de la búsqueda de enanas marrones compañeras de estrellas estriba en que no se precisa observar aquéllas. Podemos detectar la enana marrón con las mismas técnicas que se emplean para hallar planetas extrasolares: analizar los efectos periódicos que la enana marrón compañera ejerce sobre la estrella a cuyo alrededor orbita. Se determinan las variaciones en las velocidades de las estrellas a través de la medición de los corrimientos Doppler de sus líneas espectrales. Con este método resulta más fácil detectar enanas marrones que planetas, por la razón principal de que las primeras poseen una masa mayor.

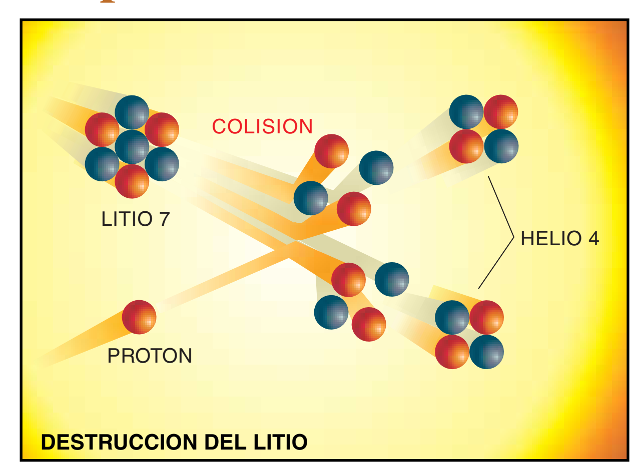
Ello no obstante, Geoffrey W. Marcy, de la Universidad estatal de San Francisco y de la Universidad de California en Berkeley, reputado "cazador" de planetas, no encontró ninguna enana marrón en su búsqueda en torno a 70 estrellas de baja masa, a finales de los ochenta. En el ecuador de los noventa, Marcy halló media docena de planetas extrasolares gigantes y gaseosos en su muestra de 107 estrellas similares a nuestro Sol, pero seguía sin dar con la prueba irrefutable de enanas marrones. Ante tamaño fracaso en la búsqueda, parecía lógico admitir que las enanas marrones escaseaban mucho más que los planetas gigantes y las estrellas. Se empezó a hablar del "desierto de las enanas marrones".

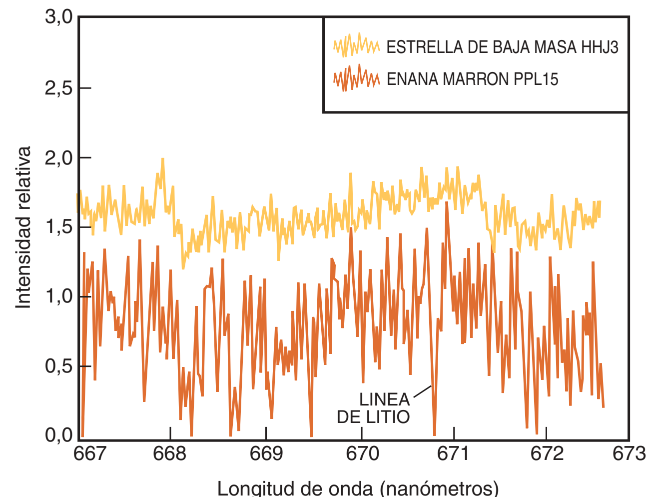
Sólo uno de los primeros rastreos, fundado en la técnica de medición de la velocidad radial (efecto Doppler), obtuvo éxito en la búsqueda de candidatos. En 1988, y entre una lista de 1000 estrellas, David W. Latham, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, descubrió un posible compañero estelar con una masa por lo menos igual a 11 veces la de Júpiter. Con el método de la velocidad radial sólo puede determinarse un límite inferior a la masa del objeto; el candidato de Latham lo mismo podía ser una enana marrón que una estrella de masa pequeña. Para resolver la naturaleza del candidato habrá que esperar a poder determinar con precisión las posiciones de las estrellas.

Mientras tanto, otros astrónomos perseguían estrategias diferentes, apoyados en cierta característica de las enanas marrones, el brillo más intenso de las jóvenes. Para buscar objetos jóvenes, nada mejor que los cúmulos estelares. Todas las estrellas del cúmulo, aunque se forman simultáneamente, difieren en su longevidad. Las estrellas de mayor masa brillan durante algunos millones de años antes de agotar su combustible de hidrógeno y dejar atrás la fase de secuencia principal de su vida, mientras que las estrellas menores permanecen luminosas por miles de millones, e incluso billones, de años. El método tradicional para averiguar la edad de un cúmulo consiste en identificar la estrella dotada de una masa mayor de la secuencia principal. La edad del cúmulo se aproximará al tiempo de vida de esa estrella.

Confirmación de los descubrimientos

La prueba del litio

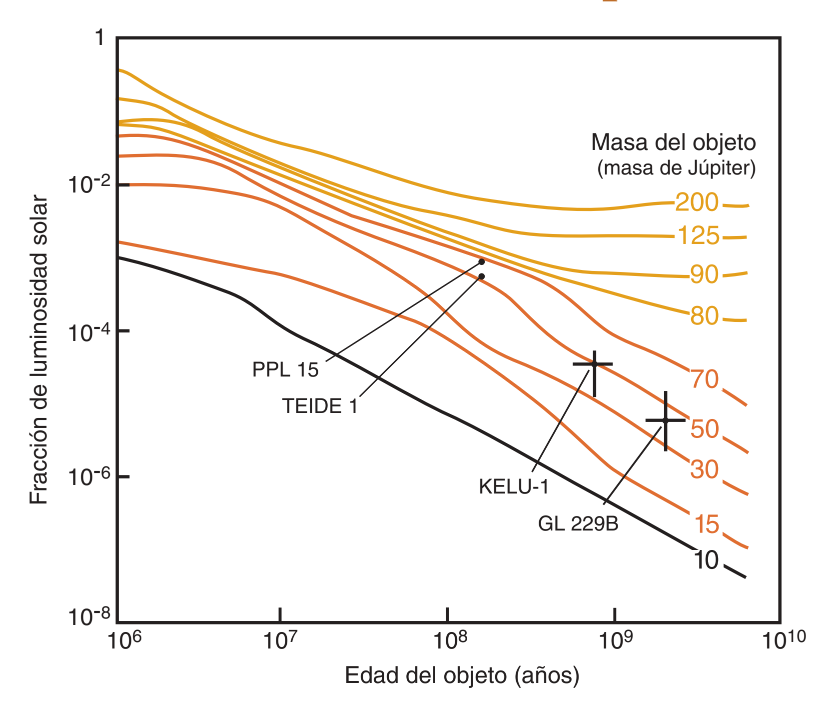




EL ANALISIS DE LOS ESPECTROS de los objetos débiles puede revelar si dichos objetos son estrellas o si se trata de enanas marrones. Las estrellas consumen en su interior el contenido de litio, reacción nuclear en que un protón choca contra el isótopo de litio 7, que se divide en dos átomos de helio (*izquierda*). Por contra, las enanas marrones, salvo las de mayor masa, no pueden sostener esta reacción en su núcleo, puesto que no alcanzan la temperatura umbral necesaria para la "destrucción" del litio; por tanto, las enanas marrones retienen el litio durante toda su vida. El espectro de HHJ 3 (*a la derecha, línea de color amarillo*), que es una estrella de baja masa en las Pléyades, no muestra signos de la presencia de litio. El espectro de PPI 15 (*línea de color rojo*) muestra, sin embargo, un rasgo significativo en absorción que indica claramente la presencia de dicho elemento.

Comparación entre estrellas, enanas marrones y planetas

Debilitándose con el tiempo



EL HISTORIAL DE LUMINOSIDAD de las estrellas de baja masa (*línea amarilla*), de las enanas marrones (*línea roja*) y de los planetas (*línea negra*) revela que sólo las estrellas tienen masa suficiente para quemar, de forma estable, hidrógeno en sus interiores; gracias a ello, mantienen una luminosidad constante. La luz emitida por las enanas marrones y los planetas se apaga a medida que envejecen. Los datos de algunas enanas marrones (*cruces negras*) indican cuán pesadas son y sus edades.

Una vez identificado un cúmulo estelar joven y determinada su edad, sólo queda descubrir los objetos más débiles y rojos (y, por tanto, más fríos) del cúmulo para establecer los candidatos a enanas marrones. Los estudios teóricos facilitan la temperatura superficial y la luminosidad esperada a una edad fijada para objetos de distintas masas; midiendo, pues, esos parámetros estimaremos la masa de cada candidato. Varios grupos de astrónomos comenzaron su propia caza cubriendo las zonas del cielo donde se encuentran los cúmulos jóvenes y seleccionando los objetos poco luminosos y rojos.

Fruto de sus trabajos, anunciaron una serie de candidatos a enanas marrones en cúmulos jóvenes, que incluían la región de formación estelar de la constelación del Toro y el cúmulo brillante de las Pléyades ("Las Siete Hermanas"). Pero, sometidos a un fino análisis posterior, se mostró que ninguno de los candidatos era una enana marrón real. Se trataba, en algunos casos, de estrellas gigantes rojas ubicadas a miles de años-luz allende el cúmulo; estas estrellas del fondo, aunque muy luminosas, aparecen bastante débiles por hallarse tan remotas. En otros casos, los contaminantes eran estrellas de masa pequeña que se encuentran delante o ligeramente por detrás del cúmulo. Algunos de estos "descubrimientos" salieron publicados en la prensa, si bien el reconocimiento posterior de su invalidez no contó con el mismo despliegue. Comenzó a cundir el escepticismo entre los astrónomos ante cualquier candidato a enana marrón. Se reforzó la idea de la escasez de esta clase de objetos.

En busca del litio

Así las cosas, Rafael Rebolo, Eduardo Martín y Antonio Magazzù, del Instituto de Astrofísica de Canarias, propusieron en 1992 un método inteligente que ayuda a distinguir de las estrellas de baja masa las enanas marrones. Denominada la prueba del litio, se funda en el siguiente dato: para masas inferiores a unas 60 veces la de Júpiter, una enana marrón nunca llega a reunir las condiciones requeridas para mantener la quema del litio en su núcleo. Esta reacción nuclear tiene lugar a una temperatura ligeramente inferior a la de la fusión del hidrógeno; como resultado, toda estrella pequeña consume sin dificultad el litio cualquiera que fuera su concentración original. Incluso las estrellas menos masivas queman su litio en menos de 100 millones de años, mientras que las enanas marrones, excluidas las de mayor masa, retienen su reserva de litio durante toda la vida. Por tanto, la presencia continua de litio constituye un signo de que un objeto tiene masa subestelar.

Las líneas espectrales del litio son bastante intensas en objetos rojos y fríos. El grupo de Canarias buscó signos de la presencia de litio en todos los objetos más fríos del cielo cuyo brillo pudiera proporcionar datos de la calidad necesaria. Ninguno de ellos mostraba litio. En 1993 otro equipo, integrado por Marcy, James R. Graham y el autor, comenzó a aplicar la prueba del litio a objetos aún más débiles. Nos servimos del telescopio Keck de 10 metros de diámetro, recién incorporado al Observatorio de Mauna Kea en Hawai. Tampoco hubo suerte en el intento; pero la fortuna cambió cuando la búsqueda se centró en las Pléyades.

Otro grupo británico había realizado poco antes una búsqueda muy profunda, que cubría un área considerable del mismo cúmulo. Hallaron varios objetos de masa subestelar, a tenor de sus propiedades. Se determinó que estos candidatos mostraban un movimiento propio común con el del cúmulo y, por tanto, tenían que ser miembros de las Pléyades y no estrellas del fondo. El equipo norteamericano apuntó directamente al más débil de los candidatos, un objeto llamado HHJ 3, con la esperanza de detectar el litio. Pero fracasó. John Stauffer, del Smithsoniano, presentó otro candidato. Este astrónomo había realizado también búsquedas de estrellas pequeñas en las Pléyades, hallando un candidato incluso más débil, denominado PPl 15 (el candidato número 15 de la búsqueda del Monte Palomar en las Pléyades). Por fin, el grupo norteamericano obtuvo éxito: por primera vez se detectó el

El ciclo de la vida de las enanas marrones

100.000 AÑOS
NUBE MOLECULAR INTERESTELAR
Radio: 100.000 millones de kilómetros
Temperatura: 10 kelvin

1 MILLON DE AÑOS
ENANA MARRON Y DISCO DE ACRECION
Radio del disco: 1000–5000 millones de km
Radio de la enana marrón: 35.000 km
Temperatura: 2900 K

10 MILLONES DE AÑOS
ENANA MARRON Y PLANETA
Radio de la órbita del planeta: 2–500 millones de km
Radio de la enana marrón: 300.000 km
Temperatura: 2900 K

100 MILLONES DE AÑOS
CONTRACCION GRAVITATORIA
Radio de la enana marrón: 100.000 km
Temperatura: 2500 K

MIL MILLONES DE AÑOS
ENFRIAMIENTO POR RADIACION
Radio de la enana marrón: 65.000 km
Temperatura: 1200 K

DIEZ MIL MILLONES DE AÑOS
DEBILITAMIENTO HASTA LA OSCURIDAD
Radio de la enana marrón: 60.000 km
Temperatura: 550 K

El disco de acreción y la órbita planetaria no están dibujados a escala

UNA ENANA MARRON NACE de la contracción gravitatoria de una nube de gas y polvo. Transcurrido un millón de años, se ha transformado ya en una bola de gas brillante, rodeada quizá de un disco de acreción del que más adelante podrá surgir un planeta. (Hasta ahora no se ha encontrado, sin embargo, ningún planeta orbitando alrededor de una enana marrón; su existencia y órbitas posibles son todavía mera hipótesis.) Con el tiempo, la enana marrón disminuye de tamaño y se enfría. En el ejemplo de la figura se presenta el caso (radio y temperatura superficial) para una enana marrón de 40 veces la masa de Júpiter.

Las estrellas y las enanas marrones comienzan su vida siguiendo un modelo común. Se supone que ambas se forman en virtud de la contracción gravitatoria de nubes interestelares de gas y polvo. Estas nubes se componen principalmente de hidrógeno y helio, aunque contienen también pequeñas cantidades de litio y deuterio, que son elementos resultantes de las reacciones nucleares desarrolladas pocos minutos después de la gran explosión.

A medida que las estrellas y las enanas marrones se contraen, sus núcleos aumentan de temperatura y densidad; los núcleos de deuterio se funden en núcleos de helio 3. La fusión del deuterio concurre, asimismo, en las enanas marrones, pues se requiere una temperatura umbral —y, por tanto, una masa pequeña— que es menor que para la fusión del hidrógeno. La energía eyectada como resultado de esas reacciones nucleares detiene momentáneamente el proceso de contracción o colapso gravitatorio, además de ser la causa principal del brillo de los objetos. Pero tras unos pocos millones de años, el deuterio se agota y el proceso de contracción comienza de nuevo. La fusión del litio ocurre a continuación en las estrellas y en las enanas marrones de masa superior a 60 veces la de Júpiter.

Durante las fases de contracción de las enanas marrones, la presión térmica del interior aumenta considerablemente y se opone a las fuerzas gravitatorias. Por acción del calor, los electrones se liberan de sus núcleos. Dado que dos electrones no pueden ocupar el mismo estado cuántico de energía, si el núcleo del objeto es muy denso los estados de baja energía ya están ocupados, razón por la cual muchos electrones se ven obligados a situarse en estados altamente excitados. Tal situación trae consigo una presión, independiente de la temperatura. A los objetos cuyo interior ofrece esas características se les llama "degenerados". Por mor de dicho proceso, todas las enanas marrones presentan aproximadamente el mismo tamaño que Júpiter; es decir, las enanas marrones más pesadas son más densas que las enanas marrones de masa menor.

Los núcleos de las estrellas nunca alcanzan el estado degenerado de la materia. Antes bien, la fusión del hidrógeno proporciona la energía suficiente para que la estrella no siga contrayéndose por culpa de su propia fuerza gravitatoria. Una vez iniciada la reacción nuclear del hidrógeno, la estrella alcanza un tamaño estable y una luminosidad y una temperatura constantes. En las enanas marrones de mayor masa, el hidrógeno comienza a fundirse, pero se frena pronto. A medida que la presión de degeneración impide el colapso gravitatorio, su luminosidad empieza a debilitarse. Aunque las estrellas más pequeñas pueden brillar por más de 1000 billones de años, las enanas marrones se apagan hasta la oscuridad. De ahí que cueste tanto dar con ellas conforme van envejeciendo. En un futuro muy lejano, cuando todas las estrellas hayan quemado su combustible, las enanas marrones serán la fuente primaria de hidrógeno del universo.

—G. B.

litio en un objeto, cuya presencia en éste implicaba necesariamente una masa subestelar. Presentamos el descubrimiento en junio de 1995, en el marco de la reunión de la Sociedad Norteamericana de Astronomía. Los resultados asignaban al cúmulo de las Pléyades unos 120 millones de años de edad, lo que significaba para PPl 15 una masa correspondiente al comienzo del dominio de las enanas marrones.

En una de esas coincidencias que ocurren a menudo en el campo de la ciencia, otros grupos informaron en 1995 sobre la existencia de pruebas convincentes de la existencia de enanas marrones. Como resultado de sus búsquedas profundas en las Pléyades, Rafael Rebolo, María Rosa Zapatero Osorio y Eduardo L. Martín, de Canarias, habían detectado dos objetos menos luminosos que PPl 15: Teide 1 y Calar 3, llamados así en homenaje a sendos observatorios astronómicos de España. Cada uno de estos objetos presenta una masa inferior a 60 veces la masa de Júpiter. Hacia finales de año, el autor formó equipo con el grupo de las islas Canarias y se confirmó la presencia esperada del litio en Teide 1 y Calar 3. Pasaron algunos meses y la comunidad astronómica persistía escéptica sobre la naturaleza de estos objetos; después de todo se parecen a las estrellas. Hasta que nuevos descubrimientos pusieron de manifiesto que las enanas marrones eran objetos reales.

En paralelo a los trabajos reseñados, otra técnica muy distinta comenzó a dar sus frutos. Un grupo de astrónomos del Instituto de Tecnología de California (Caltech) y de la Universidad Johns Hopkins estaba realizando una búsqueda de enanas marrones que fueran compañeras de estrellas cercanas y de masa pequeña. Al telescopio de 1,5 metros de diámetro del Monte Palomar se le dotó de un instrumento que bloqueaba la mayor parte de la luz procedente de la estrella y permitía que un posible compañero más débil se detectara mejor. En 1993 observaron varios candidatos a enanas marrones. Para asegurarse de que no se trataba de estrellas del fondo, repitieron las imágenes un año después. Dado que las estrellas seleccionadas se hallan muy próximas a nuestro sistema solar, se perciben sus movimientos en la galaxia cuando se comparan con las estrellas del fondo. Si un candidato es un compañero genuino, deberá presentar el mismo movimiento. Uno de estos compañeros, confirmado con este procedimiento, era mil veces más débil que su primaria, la estrella de baja masa Gliese 229A. Puesto que la estrella ya de por sí también era poco brillante, la luminosidad del compañero estaba muy lejos del menor valor posible para una estrella. Los científicos no anunciaron su descubrimiento hasta que obtuvieron el espectro infrarrojo del candidato.

Una mañana radiante

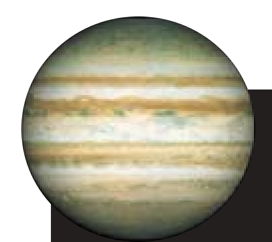
En el Congreso de Cambridge sobre estrellas frías, sistemas estelares y el Sol, celebrado en octubre de 1995, el grupo del Caltech y de la Universidad Johns Hopkins dio a conocer sus estudios sobre Gl 229B, la compañera enana marrón de Gl 229A. No cabía duda de que constituía un objeto subestelar, habida cuenta de su poca luminosidad; la confirmación definitiva vino dada por la detección de metano en su espectro. El metano, molécula común en las atmósferas de los planetas gigantes, no puede formarse en las estrellas, demasiado calientes para ello. La presencia tan notable de metano en Gl 229B obliga a rechazar que el objeto sea una estrella. En la misma conferencia, el grupo de Canarias informó que sus observaciones en las Pléyades cosecharon una nutrida población de enanas marrones, lo que sugería una abundancia de las mismas en el firmamento. Sumándose a estos descubrimientos, el equipo dirigido por Michel Mayor, del Observatorio de Ginebra, anunció el hallazgo del primer planeta extrasolar, un gigante de gas que giraba alrededor de la estrella 51 Pegasi. Fue aquélla una mañana prodigiosa en que se dio carpetazo a la frustración en la búsqueda de enanas marrones.

Los astrónomos vieron en Gl 229B la primera enana marrón indiscutible: millones de veces menos luminosa que el Sol y con una temperatura superficial del orden de los 1000 kelvin, muy por debajo de la temperatura mínima que la estrella más pequeña podría tener (unos 1800 kelvin). Gl 229B ha alcanzado dicho estado porque apenas si cuenta con unos pocos miles de millones de años de edad. No obstante, su edad precisa se desconoce, lo que induce a cierta indeterminación en la estimación de su masa, cifrada entre 30 y 40 veces la de Júpiter. Por contra, PPl 15, Teide 1 y Calar 3 muestran una masa mayor (entre 50 y 70 veces la de Júpiter) y temperaturas superficiales más altas (entre 2600 y 2800 kelvin), debido sobre todo a su menor edad.

Una vez contrastada la eficacia de los métodos utilizados para la detección de enanas marrones, continúan aumentando los hallazgos. Varios grupos investigan en las Pléyades. El de Canarias ha encontrado una enana marrón de sólo 35 veces la masa de Júpiter, la menor de las conocidas en las Pléyades. Y lo que reviste una sobresaliente importancia, este grupo ha contabilizado el número de las descubiertas en su área de inspección, para extrapolar luego dichos cálculos al cúmulo entero. Infieren así que la cifra de enanas marrones en las Pléyades viene a equipararse con el número de estrellas. Si andan en lo cierto, nuestra galaxia sola contendría unos 100.000 millones de enanas marrones. Pero también significaría que las enanas marrones no son el material dominante de la masa total del universo, pues se trata de cuerpos mucho menos pesados que las estrellas. La esperanza de que este tipo de objetos contribuyera a aclarar el misterio de la materia oscura se ha desvanecido.

Otros investigadores se han concentrado en el estudio de la distribución de las enanas marrones en función de su masa. ¿Cuál es la mínima masa que puede adquirir una enana marrón? ¿Existe un continuo de estos objetos hasta el rango de los planetas, por debajo de 13 veces la masa de Júpiter? ¿O existe, acaso, un hiato entre la menor de las enanas marrones y el planeta de mayor masa porque una y otro se forman de manera distinta? El lugar ideal del firmamento donde acudir para resolver estas cuestiones se encuentra en las regiones de formación estelar; allí, hasta las enanas marrones de masa muy pequeña brillan todavía lo suficiente para dejarse ver. Las búsquedas realizadas en la región del Toro por astrónomos japoneses y en la región de Orión por los grupos de Canarias y la Universidad de Berkeley revelan la existencia de objetos cuyas masas se estiman muy próximas al límite de las 13 veces la masa de Júpiter. Parece ser, por tanto, que las enanas marrones se producen en todo el rango posible de masas entre las estrellas y los planetas.

En 1997 el equipo de Mayor informó de la detección de unos 10 candidatos a enanas marrones encontrados por el método de la velocidad radial, tras una búsqueda de objetos subestelares alrededor de unas 600 estrellas similares al Sol. Pese a ello,



Planetas y enanas marrones

¿Existe alguna diferencia sustancial entre los planetas de mayor masa y las más pequeñas de las enanas marrones? De acuerdo con la tesis tradicional, los planetas nacen de forma distinta del modo en que lo hacen enanas marrones y estrellas. Los planetas gigantes gaseosos se originan a partir de planetesimales —cuerpos rocosos y helados— en un disco de gas y polvo alrededor de las estrellas. A los pocos millones de años, estos núcleos sólidos están capacitados para atraer grandes cantidades de material gaseoso. Se trata de un modelo fundado en lo que sabemos del sistema solar; predice que todos los planetas deberían encontrarse en órbitas circulares alrededor de las estrellas y que los planetas gigantes gaseosos deberían moverse a distancias importantes.

Semejante explicación de la formación planetaria se ha visto amenazada con los nuevos descubrimientos de planetas extrasolares gigantes. La mayoría de estos cuerpos se encuentran en órbitas muy próximas a las estrellas y presentan movimientos que distan mucho de ser circulares. Algunos teóricos, además, han predicho la existencia de planetas solitarios, expulsados de sus órbitas más allá de sus sistemas estelares como consecuencia de la interacción con otros planetas. Por ese motivo no les resulta fácil a los astrónomos observacionales distinguir entre los planetas y las enanas marrones partiendo de cómo y dónde se originaron, o según su actual localización y movimiento. Las enanas marrones aparecen constituidas en objetos solitarios, aunque también se encuentran formando sistemas con otras estrellas y otras enanas marrones. Lo mismo podría ser cierto para los planetas gigantes.

Empieza a abrirse paso otro punto de vista alternativo para distinguir entre una enana marrón y un planeta. Se basa en la posibilidad de que el objeto en cuestión haya o no presentado, en algún momento de su vida, las condiciones necesarias para que algún tipo de reacción nuclear se dé en su interior. En esta perspectiva, la línea divisoria entre los dos cuerpos se establece en 13 veces la masa de Júpiter. Hay fusión del deuterio en masas por encima de dicho valor. Puesto que las enanas marrones parecen ser menos abundantes que los planetas alrededor de estrellas masivas, es muy posible que estos cuerpos sufran mecanismos de formación distintos. Sin embargo, una separación basada en una masa determinada es más susceptible de ser observada.

EL CONTINUO DE OBJETOS entre los planetas y las estrellas (*abajo*) muestra que las enanas marrones de mayor edad, pensemos en Gliese 229B, son bastante similares a los planetas gigantes gaseosos en tamaño y temperatura superficial. Las enanas marrones más jóvenes, así Teide 1, guardan, en cambio, mayor parecido con GL 229A y otras estrellas de baja masa. Las enanas marrones y las estrellas de masa pequeña son objetos convectivos, lo que significa que mezclan sin cesar su contenido material (*izquierda*). Las reacciones termonucleares desarrolladas en los núcleos de las estrellas destruyen fácilmente el litio, por lo que la presencia de este elemento en los objetos más fríos es un claro indicio de que se trata de una enana marrón.



NOMBRE	JUPITER	GLIESE 229B	TEIDE 1	GLIESE 229A	SOL
TIPO DE OBJETO	Planeta gigante gaseoso	Enana marrón	Enana marrón	Estrella enana roja	Estrella enana amarilla
MASA (Júpiter)	1	30–40	55	300	1000
RADIO (kilómetros)	71.500	65.000	150.000	250.000	696.000
TEMPERATURA (kelvin)	100	1,000	2600	3400	5800
EDAD (años)	4500 millones	2000–4000 millones	120 millones	2000–4000 millones	4500 millones
FUSION DE HIDROGENO	No	No	No	Sí	Sí
FUSION DE DEUTERIO	No	Sí	Sí	Sí	Sí

perduraba la idea del desierto de las enanas marrones, pues se observaba un número de enanas marrones compañeras de estrellas menor que de planetas extrasolares, no obstante la fácil detección de las primeras mediante la técnica del corrimiento Doppler. El análisis posterior de tales resultados, que contó con la ayuda del satélite Hipparcos (al que debemos mediciones precisas de las órbitas de las estrellas) reveló que por lo menos la mitad de la muestra de las candidatas de Mayor no eran en realidad enanas marrones, sino estrellas de muy baja masa. El desierto se hacía más yermo. Los estudios continuados de Marcy en una muestra más extensa de estrellas de tipo solar confirmaban también la escasez de enanas marrones como compañeras de éstas.

Pero las enanas marrones podrían abundar más en torno a estrellas de masa inferior a la solar. En 1998 Rebolo y sus colaboradores hallaron uno de estos objetos subestelares alrededor de la estrella joven G 196-3. Pese a su edad, ha bajado bastante la temperatura de esta enana marrón, señal de su poca masa, probablemente unas 20 veces la masa de Júpiter. También se han detectado varias enanas marrones compañeras de estrellas en formación. Y más recientemente, se han identificado los primeros sistemas binarios que involucran la presencia de dos enanas marrones. En colaboración con Martín, el autor ha determinado que la enana marrón de las Pléyades PPl 15 constituye, en realidad, una pareja de enanas marrones con un período orbital de casi 6 días. Junto con Wolfgang Brandner, se han tomado imágenes de otros pares de enanas marrones muy próximos al sistema solar. Estos sistemas permitirán, en el intervalo de una década, determinar las masas dinámicas de las enanas marrones componentes.

Tales observaciones sugerían que el desierto de enanas marrones concernía sólo a su presencia en torno a estrellas masivas. Si se buscaran como compañeras de objetos de menor masa (estrellas u otras enanas marrones), la probabilidad de encontrar una enana marrón sería mayor. Ello pudiera deberse al proceso engendrador de sistemas binarios, harto desconocido todavía. Por lo que parece, este proceso no se muestra proclive para producir objetos primarios cuya masa decuplique la de los compañeros secundarios.

Enanas marrones por doquier

Los astrónomos continúan encontrando enanas marrones a través de otra técnica de búsqueda, el rastreo aleatorio del firmamento. Estas enanas marrones “del campo” aparecen perdidas entre los millares de estrellas de nuestra galaxia. Para localizarlas con eficacia es necesario cartografiar grandes áreas con una sensibilidad notable a las fuentes débiles y rojas. La primera enana marrón del campo fue anunciada por María Teresa Ruiz, de la Universidad de Chile, en 1997. Se denominó Kelu 1, término tomado prestado de la voz de una tribu de América del Sur que designa el color “rojo”. Ruiz destacó que tenía litio en su atmósfera. Casi al mismo tiempo, el programa de Búsqueda Profunda en el Infrarrojo Cercano (DENIS) —un proyecto europeo para cartografiar el cielo del hemisferio sur— detectó otros tres objetos similares. No tardó en confirmarse la presencia de litio en uno de ellos.

La investigación sin tregua de estos objetos permite profundizar en el conocimiento de la composición metálica de las atmósferas de las enanas marrones. Sus espectros ópticos carecen de moléculas de óxido de titanio y óxido de vanadio, absorbentes principales de la luz en los espectros de las estrellas pequeñas. En las atmósferas de las enanas marrones faltan esas moléculas porque los elementos pesados se condensan en granos de polvo difíciles de romper. En cambio, las principales líneas de los espectros ópticos se deben a los átomos neutros de metales alcalinos: sodio, potasio, rubidio, cesio y, en algunos casos, litio.

La búsqueda de todo el cielo realizada en 2 micras (2MASS), programa dirigido por la Universidad de Massachusetts, ha detectado unos 100 objetos extremadamente fríos, confirmándose la presencia de litio en una veintena de ellos. La mayoría de estos objetos del campo presentan temperaturas superficiales entre los 2200 y 1600 kelvin; no llegan, pues, a los 1000 millones de años de edad. Por su juventud se trata de objetos relativamente brillantes, y así no entraña su detección especial dificultad.

La caza de enanas marrones de edades mayores resultó un fracaso hasta el verano de 1999, momento en que la búsqueda “Inspección digital Sloan del firmamento” reveló la existencia de dos de ellas, que contenían metano en sus atmósferas. Si hay metano, la temperatura superficial de estas enanas marrones no alcanzará los 1300 kelvin y su edad superará los 1000 o 2000 millones de años. Al mismo tiempo, el equipo de 2MASS también informó sobre la detección de otros cuatro cuerpos de características similares. La mayoría de la población de enanas marrones de nuestra galaxia debe contener metano, dado que se formaron hace tiempo y se han enfriado hasta ese punto. De todos esos hallazgos se infiere que conocemos sólo la punta del iceberg. De hecho, los equipos de 2MASS y DENIS han observado que el número de enanas marrones del campo en las regiones del cielo examinadas es similar al de las estrellas de baja masa en esas mismas zonas. Resultados que evidencian plena coherencia con los obtenidos en el cúmulo de las Pléyades: las enanas marrones parecen abundar tanto como las estrellas.

La fase inicial del descubrimiento de las enanas marrones puede darse por terminada. Se dispone ya de métodos eficaces para encontrarlas y de numerosas fuentes para proceder a su estudio detallado. En los próximos años se abordará el análisis de las propiedades básicas de las enanas marrones: su número, masa y distribución en nuestra galaxia. La ciencia intentará comprender su formación en cuanto compañeras de estrellas o en cuantos objetos solitarios, así como desvelar los procesos que tienen lugar a medida que sus atmósferas se enfrían. Es curioso que estos objetos, a pesar de su presencia parangonable a la de las estrellas, hayan tardado tanto en empezar a revelarnos sus secretos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BROWN DWARFS: A POSSIBLE MISSING LINK BETWEEN STARS AND PLANETS. S. R. Kulkarni en *Science*, vol. 276, págs. 1350-1354; 30 de mayo, 1997.

PLANET QUEST: THE EPIC DISCOVERY OF ALIEN SOLAR SYSTEMS. Ken Croswell. Free Press, 1997.

BROWN DWARFS AND EXTRASOLAR PLANETS. Dirigido por R. Rebolo, E. L. Martín y M. R. Zapatero Osorio. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 134; 1998.

Cadenas unidimensionales de átomos

Podemos estudiar y fabricar el menor de los dispositivos electrónicos imaginables, un átomo colocado entre dos electrodos metálicos

Gabino Rubio Bollinger, Nicolás Agraït y Sebastián Vieira

El llegar a la conclusión de que la materia está compuesta de átomos ha sido un éxito de la inteligencia humana. Richard P. Feynman pensaba que si de todo el conocimiento científico sólo se pudiera legar a las generaciones venideras una sentencia breve, ésta debería recoger el "hecho atómico". En expresión suya: "Todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas que se desplazan en movimiento perpetuo, atrayéndose mutuamente cuando están próximas y repeliéndose cuando se intenta estrujar unas contra otras."

En la aceptación de este "hecho" está el origen de muchas de las ideas que han hecho a la humanidad progresar en el conocimiento del mundo natural. Feynman afirmaba que el estudio de la naturaleza bajo el prisma del "hecho atómico" había sido muy fructífero en todos los ámbitos de la ciencia. En esta línea, y refiriéndose al fascinante mundo de la biología, sugería como fundamental la siguiente hipótesis: "No hay nada de lo que hacen las cosas vivas, que no pueda ser comprendido desde el punto de vista de que están compuestas de átomos que actúan según las leyes de la física." Enunciados similares se podrían hacer para otras ramas de la ciencia.

1. UN MICROPUENTE DE ALUMINIO, fabricado mediante nanolitografía de haz de electrones, en el que podemos separar de forma controlada los electrodos izquierdo y derecho hasta dejarlos conectados por un solo átomo. Esta es la técnica utilizada por C. Urbina y E. Scheer, del grupo Quantronique del laboratorio de Saclay, para estudiar los contactos monoatómicos.

Los avances científicos y técnicos que han surgido de la interpretación en términos atómicos del comportamiento de la materia son numerosos. La explicación microscópica de la superconductividad dada por John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer, la teoría BCS (iniciales de sus apellidos), dio pie a un incremento notable de las aplicaciones de un fenómeno físico descubierto por Heike Kamerlingh-Onnes en 1911.

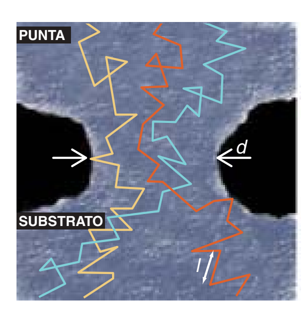
Asimismo, el desarrollo de teorías que, partiendo del hecho atómico, han permitido explicar otros comportamientos macroscópicos de los sólidos, posibilitó la invención del transistor y la ulterior carrera hacia la miniaturización de los dispositivos electrónicos.

La fascinación creciente de lo pequeño nos ha llevado hasta el mundo nanoscópico, en el que las dimensiones de las estructuras se mueven en el rango de los nanómetros (millonésimas de milímetro); constan, pues, de un número reducido de átomos.

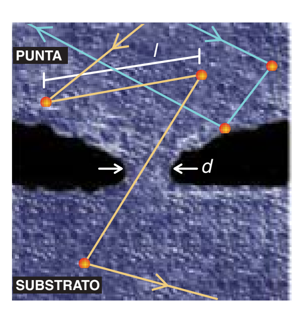
En el mundo nanoscópico se manifiesta la fenomenología cuántica con claridad creciente conforme decrece la agitación térmica de los átomos al bajar la temperatura. Para el acceso a este mundo se han ideado varios caminos. Entre los más directos, los que se proponen traer a la vista estas estructuras de tamaño nanométrico, también llamadas estructuras nanoscópicas o nanoestructuras.

Desde su invención hace más de cuarenta años, las microscopías electrónicas han suministrado, y siguen suministrando, un flujo incesante de información en diversos campos de la ciencia y de la tecnología. Bajo condiciones especiales, con los microscopios más potentes podemos

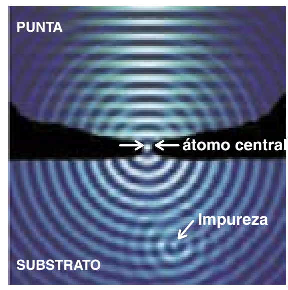
2. TRANSPORTE de electrones a través de un contacto metálico. Varía en razón del tamaño relativo entre las dimensiones del contacto mismo (*d*), el recorrido libre medio de los electrones entre colisiones (*l*) y la longitud de onda de los electrones de conducción (λ_F).



Transporte clásico
El tamaño del contacto (*d*) es mucho mayor que el recorrido libre medio de los electrones (*l*), que sufren numerosas colisiones al atravesar el contacto. Su comportamiento es similar al de un flujo de gas que discurre por una tubería.



Transporte balístico
El tamaño del contacto es parecido al recorrido libre medio de los electrones, que pueden atravesar el contacto sin sufrir apenas colisiones. Este transporte es similar al de la efusión de un gas por un orificio muy pequeño. Las moléculas del gas, en continuo movimiento, chocan contra las paredes del recipiente, pero donde encuentran un orificio se escapan de él.



Transporte cuántico
El tamaño del contacto es parecido a la longitud de onda de los electrones. Su naturaleza ondulatoria se manifiesta con nitidez. Una onda plana incidente sobre el átomo central se transmite en al substrato en forma de onda cuasiesférica y, parte, se refleja dentro de la punta. Pueden producirse fenómenos de interferencia y difracción tras la reflexión en una impureza del sólido.

observar los átomos de algunos materiales.

Pero el paso hacia el nanomundo requería herramientas capaces no sólo de ver, sino también de manejar y controlar la materia a escala atómica. Se exigía una suerte de "dedos" que recorrieran, a voluntad, distancias inferiores a los tamaños atómicos y poseyeran "sensibilidad" suficiente para percibir la configuración de los átomos.

Gerd Binning y Heinrich Rohrer inventaron en 1982 el microscopio de efecto túnel, la esperada herramienta. Los "dedos" en cuestión estaban hechos de cerámicas piezoeléctricas. La "sensibilidad" venía garantizada por la influencia ejercida por la distancia sobre la corriente de electrones que pasaba, mediante efecto túnel, entre dos electrodos separados escasos nanómetros.

En un principio, ese ingenio se utilizó para obtener imágenes que reproducían la situación de los átomos en la superficie de materiales conductores. Pronto se comprobó que la herramienta abría un nuevo campo de experimentación: el de la modificación voluntaria, controlada, de superficies conductoras. Esta modificación podía ser elemental, como el simple desplazamiento de un átomo de una posición a otra. A la herramienta de Binning y Rohrer siguieron otras que, con "dedos" similares, recurrían a otros principios físicos para alcanzar la "sensibilidad" necesaria.

El contacto monoatómico

Con estas nuevas herramientas podemos estudiar y fabricar el menor de los dispositivos electrónicos imaginables, un átomo colocado entre dos electrodos metálicos. ¿Cómo se comporta el artilugio? No debiera, en principio, resultar difícil contestar la pregunta, tal es la sencillez aparente de la estructura.

Sin embargo, desde principios de los noventa, varios laboratorios habían venido realizando experimentos para determinar el comportamiento del flujo de electrones en contactos cada vez más pequeños. Pero no existía acuerdo sobre los resultados.

Así las cosas, tres grupos de investigación —de Saclay, Leiden y Madrid— decidimos sumar esfuerzos para estudiar la influencia ejercida por el átomo central del contacto sobre los resultados experimentales.

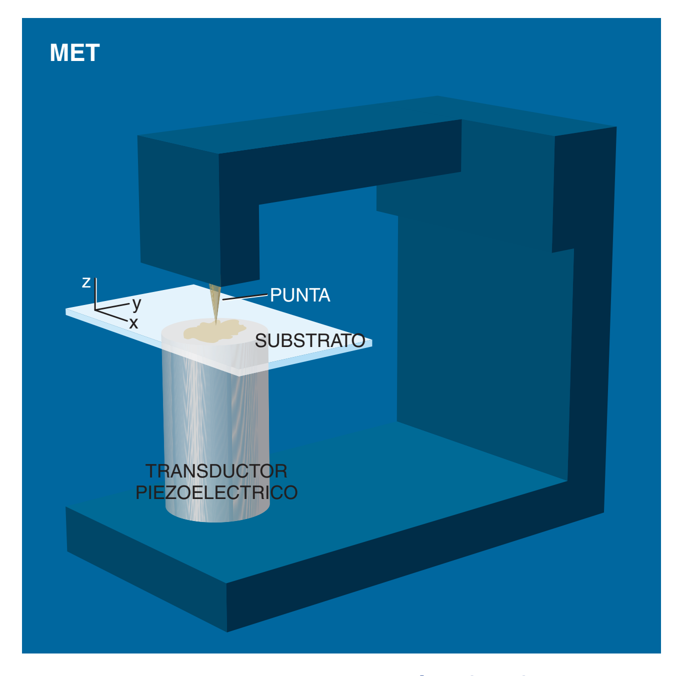
El transporte de electrones a través de una estructura nanoscópica no puede analizarse como en un conductor macroscópico, ya que cuando sus dimensiones son similares a la longitud de onda de los electrones el transporte es coherente y aparecen fenómenos de interferencia y difracción. En este régimen cuántico de conducción el transporte de electrones cursa a través de "canales", cada uno de los cuales se caracteriza por una cierta probabilidad de transmitir electrones. Se dice que un canal está completamente abierto cuando la probabilidad de transmisión es cercana a uno; está cerrado cuando la transmisión es cero, y está parcialmente abierto cuando la probabilidad de transmisión tiene un valor intermedio entre cero y uno. La conductancia eléctrica total de un sistema es la suma de las probabilidades de transmisión de cada canal multiplicada por la unidad cuántica de conductancia G_0, cuyo valor es $2e^2/h$, donde e simboliza la carga del electrón y h, la constante de Planck.

La conductancia total G del sistema se obtiene midiendo la corriente que atraviesa el contacto cuando se aplica una diferencia de potencial entre ambos electrodos. Pero en el desarrollo de esa operación no se obtiene información alguna acerca de los coeficientes de transmisión, T_i, de los canales cuando el número de éstos es superior a uno. Dicho de otro modo: de esa medición no puede derivarse el grado de apertura de los canales.

Los experimentos acometidos en un comienzo para determinar la conductancia de un contacto de oro, que se suponía monoatómico, daban como resultado un valor muy cercano al cuanto de conductancia, G_0. Ello hacía suponer que el átomo de oro tenía un canal solo, cuya probabilidad de transmisión se acercaba a uno; un canal, pues, casi completamente abierto.

Sin embargo, no ocurría lo mismo si los experimentos concernían a átomos de plomo, aluminio, niobio, níquel o platino. Se observaba entonces que la conductancia presentaba valores desde 0,5 hasta 4 unidades cuánticas. Ahora, los resultados abrían una doble posibilidad: o no había un contacto monoatómico, sino poliatómico, o un átomo podía tener varios canales de conducción.

En una resistencia óhmica, la intensidad de corriente en función de



Microscopio de efecto túnel (MET)
El nombre de este microscopio nos remite a su principio básico, el efecto túnel cuántico de electrones. Según el mismo, existe cierta probabilidad de que circulen electrones entre dos electrodos, punta y substrato, aunque medie una separación entre ellos. La posición, a escala atómica, de la punta o del substrato se establece mediante transductores piezoeléctricos, que permiten realizar movimientos controlados con una precisión de hasta una fracción de distancia interatómica.

Microscopio de fuerzas atómicas (MFA)
Del microscopio de efecto túnel deriva el de fuerzas atómicas. En este caso, sin embargo, la magnitud medida es la fuerza entre los últimos átomos del extremo de una punta afilada y la superficie de un substrato. Dicha magnitud se obtiene a partir del valor resultante de la medición de la deformación que sufre un fleje o lámina delgada cuando actúan fuerzas entre la punta y la superficie del substrato.

3. LOS MICROSCOPIOS de efecto túnel (MET) y de fuerzas atómicas (MFA) no sólo permiten ver una superficie con resolución atómica, sino también manipular uno a uno los átomos del substrato.

la diferencia de potencial aplicada dibuja una línea recta. Cuando se lleva a cabo el experimento en un material que se encuentre en estado superconductor, la curva característica de intensidad ya no es lineal, sino que presenta una rica estructura para voltajes pequeños. El grupo de Saclay descubrió que el análisis de esta curva permitía descomponer la conductancia total de un contacto monoatómico en la suma de las contribuciones de distintos canales, cada uno con una probabilidad de transmisión determinada.

Apoyados en ese hallazgo, para establecer la influencia ejercida por la naturaleza química del átomo sobre su conductancia, se decidió que cada grupo experimentase con un metal distinto: plomo, niobio y aluminio. En el caso del plomo y del niobio, el experimento se realizó a una temperatura de 1,5 kelvin (un grado y medio sobre el cero absoluto); con el aluminio fue necesario alcanzar 40 milésimas sobre el cero absoluto.

Tras estos experimentos, nos vimos obligados a abandonar definitivamente la idea de un "canal por átomo", pese a su atractiva sencillez. En los contactos monoatómicos investigados comprobamos que había más de un canal por átomo; la cifra exacta de canales dependía de la especie química del átomo, limitada por el número de orbitales de valencia de cada elemento. Así, un contacto monoatómico de aluminio podía presentar hasta tres canales, no necesariamente abiertos. Pero el átomo de plomo disponía de hasta cuatro canales de conducción, uno de ellos casi siempre cerrado. En el contacto monoatómico de niobio se observaban hasta cinco canales cuánticos de conducción.

Para nuestra fortuna, el experimento confirmó que el contacto monoatómico de oro mostraba un solo canal de conductancia, generalmente muy abierto. La determinación de la distribución de canales que presentaba un contacto de un átomo parecía condicionar su capacidad de transporte de electrones. El flujo de corriente superconductora que podía transportar un contacto (corriente Josephson) dependía no sólo de la conductancia total del contacto, sino también de la distribución de transmisiones de sus canales. Resultaba claro que, para dar una explicación coherente de los fenómenos observados, debíamos conocer el número de canales y la probabilidad de transmisión de cada uno de ellos.

Un circuito de siete átomos

Tanto el grupo de Leiden como el nuestro habíamos observado que, en ocasiones, al separar los electrodos, el contacto de un solo átomo no se rompía; parecía poder "estirarse" varios nanómetros, fenómeno sorprendente habida cuenta de que el diámetro de un átomo de oro es 0,28 nanómetros. Durante el proceso, la conductancia permanecía casi constante con un valor cercano a un cuanto de conductancia, igual que en un contacto monoatómico.

¿Se estaría acaso formando una cadena de varios átomos en fila india? En teoría, una cadena de átomos de oro debía tener un canal de conductancia casi abierto, ya que, al tratarse

GABINO RUBIO BOLLINGER, NICOLAS AGRAÏT y SEBASTIAN VIEIRA son profesores del departamento de física de la materia condensada en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), donde llevan a cabo sus investigaciones en el Laboratorio de Bajas Temperaturas. Los tres pertenecen también al Instituto Universitario de Ciencia de Materiales "Nicolás Cabrera" de la UAM.

de transporte cuántico, la cadena unidimensional se comportaría como una guía de ondas para los electrones, salvo pequeños efectos de interferencia derivados de la naturaleza finita y acotada de la cadena.

Al principio sólo podíamos extraer una cadena de siete átomos a partir del contacto monoatómico una vez de cada diez mil intentos. Pero la nueva estructura prometía ser un objeto muy interesante. Si alcanzara cierta longitud, sus estados electrónicos y modos vibracionales deberían ser los de un sistema unidimensional.

Aunque la obtención de una cadena a partir del contacto de un átomo se produce en contadas ocasiones, podíamos llevar a cabo los intentos a un ritmo muy rápido, a razón de diez por segundo. Y lo que encerraba mayor interés: cuando creábamos una cadena, podíamos detener el proceso y mantenerla estable durante horas, permitiendo, así, su estudio pormenorizado.

El "cable" catenario, formado por una serie de átomos, no sólo sería el menor y más fino en el que cabría pensar, sino que las peculiaridades propias del transporte unidimensional de electrones, y las interacciones de éstos con los átomos de la cadena, deberían también ser muy distintas de las que se producían en un sólido tridimensional.

Hasta ese momento nadie había conseguido producir las cadenas atómicas y ni siquiera estaba claro, desde el punto de vista teórico, que fuera posible. Había que encontrar una prueba, algo que nos convenciera de su realidad. Comparando los resultados de Leiden con los de Madrid, veíamos que eran equivalentes. Contra la posibilidad de que se tratara de un artefacto experimental estaba el hecho de que utilizábamos técnicas muy distintas.

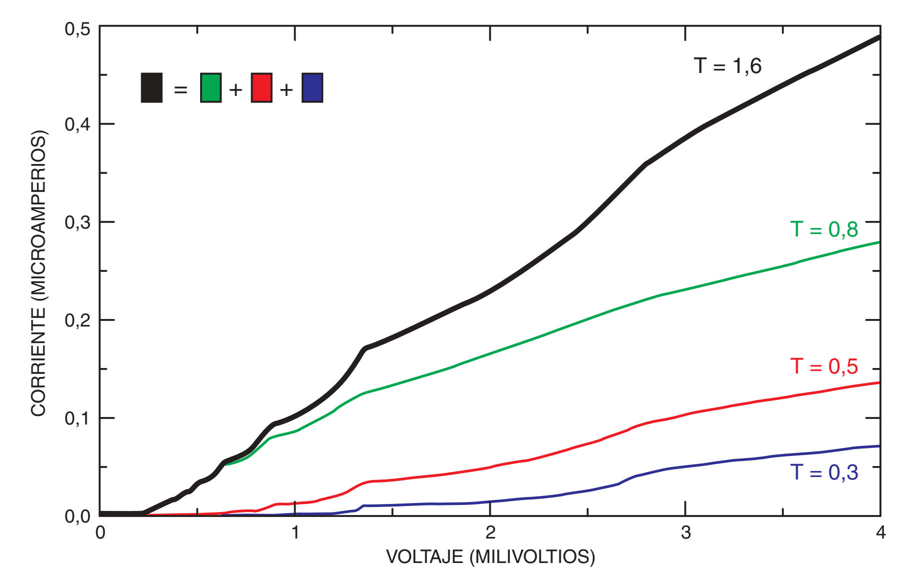
Por fin, dimos con la clave al descubrir el comportamiento mecánico de lo que presumiblemente era una cadena. Por una parte, al estirarla, llegaba un momento en el que se perdía el contacto eléctrico; los átomos de la cadena se desplomaban ("colapsaban") sobre los electrodos. Semejante comportamiento sólo podía suceder si la estructura "misteriosa" que manteníamos entre los electrodos era intrínsecamente inestable ante la rotura por uno de sus puntos; circunstancia que concurría si la estructura era muy esbelta, como una cadena de átomos.

Por otra parte, el estiramiento que había que aplicar a la cadena para que se rompiera tenía valores preferentes, a intervalos regulares, de longitud similar al diámetro de un átomo de oro. Semejante comportamiento sólo se justificaba si la estructura en cuestión constituía una cadena de átomos en fila india.

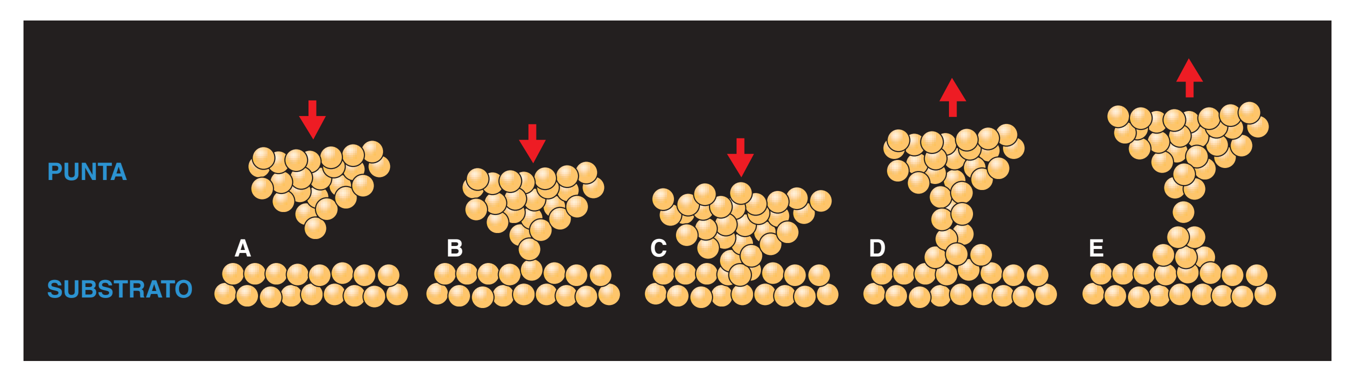
Nos convencimos de que habíamos fabricado una cadena de átomos cuando observamos que, al desplazar lateralmente uno de los electrodos, la estructura evidenciaba una gran flexibilidad. Nuestros resultados experimentales se vieron reforzados tras la obtención, por un grupo japonés, de la imagen de una cadena de átomos a través de un microscopio electrónico de transmisión.

Las dimensiones minúsculas de la cadena de átomos posibilitaban que soportara una elevada densidad de corriente. En un conductor, la disipación de calor se produce por las colisiones que sufren los electrones. Entre colisión y colisión, el electrón viaja una distancia llamada "recorrido libre medio". Puesto que la cadena tenía un tamaño mucho menor que este recorrido libre medio, las colisiones de los electrones se producían, a esta escala, lejos de los átomos de contacto. Por tanto, la cadena de átomos no se calentaba, ya que la energía se disipaba lejos, y la densidad de corriente en la cadena podía alcanzar valores de hasta cien millones de ampères por milímetro cuadrado, densidad mucho mayor que la que puede atravesar un cable doméstico (10 ampères por milímetro cuadrado aproximadamente).

Queda mucho por conocer sobre los fenómenos exóticos que aparecen en un conductor eléctrico de una sola dimensión. Y hasta nuestro trabajo, el número de sistemas experimentales unidimensionales era muy reducido. El hallazgo de la cadena de átomos metálicos proporciona un nuevo conductor eléctrico unidimensional singular que, al estar conectado directamente a los electrodos que lo sujetan, permitirá estudiar tanto el transporte de electrones a través del mismo, como sus propiedades mecánicas, relacionadas con las fuerzas que mantienen unidos a los átomos.



4. A BAJAS TEMPERATURAS, cercanas al cero absoluto, el contacto puede encontrarse en estado superconductor. Cuando esto sucede, la corriente eléctrica (*línea negra gruesa*) que circula a través del átomo —aquí, un átomo de plomo— no varía linealmente con la diferencia de potencial que se establece entre los electrodos. Esta curva característica, propia de un contacto entre dos superconductores, puede explicarse si la corriente total es la suma de las contribuciones (*líneas finas*) de varios canales cuánticos de conducción. (Cálculos realizados por A. Martín-Rodero, A. Levy Yeyati y J. C. Cuevas, de la Universidad Autónoma de Madrid.)



5. FASES DE LA FABRICACION de un contacto monoatómico. Los electrodos, punta y substrato de un microscopio de efecto túnel están, en un comienzo, separados (*A*). De una manera controlada se provoca su acercamiento hasta formar un contacto de un solo átomo (*B*). Si se quiere, ese proceso puede incrementarse hasta unas pocas decenas de átomos (*C*). A continuación, si se separa, también de una forma controlada, la punta del substrato, la estructura se alarga y se estrecha (*D*), hasta tener un contacto constituido por un único átomo (*E*).

Fuerzas entre átomos

Con todo, uno de los atractivos más sugerentes de estas estructuras de tamaño atómico radica en su manipulación controlada. Expongamos, pues, cómo se llega al contacto monoatómico, un proceso mecánico de indudable interés.

En el comienzo del ensayo, los dos electrodos, punta y substrato de un microscopio de efecto túnel, se encuentran separados. Luego, se hace avanzar uno de los electrodos (la punta, por ejemplo) hasta que se produce el contacto con el otro electrodo, contacto formado por uno o más átomos.

Podemos entonces retraer de forma controlada uno de los electrodos hasta conseguir un contacto monoatómico. ¿Qué leyes mecánicas rigen este proceso? ¿Podemos determinar las fuerzas necesarias para obtener un contacto monoatómico a partir de un contacto más extenso?

Según la teoría sabíamos que las fuerzas involucradas en el proceso de reducción serían minúsculas, de magnitud similar a las que mantienen unidos a los átomos que forman un sólido o una molécula. Por tanto, el dispositivo experimental que nos permitiría medir las fuerzas debía tener una precisión extrema y ser sensible a fuerzas de sólo unas decenas de billonésimas de newton (10 newton es aproximadamente el peso de un kilogramo).

Para medir en ese entorno de valores se requería un microscopio de fuerzas atómicas (MFA), una variante del microscopio de efecto túnel. Con un MFA podíamos medir la fuerza ejercida entre los últimos átomos del extremo de una punta afilada y los átomos de una superficie; bastaba con montar la punta sobre un elemento flexible y medir la deformación sufrida por éste, valor a partir del cual calcularíamos la fuerza sobre la punta.

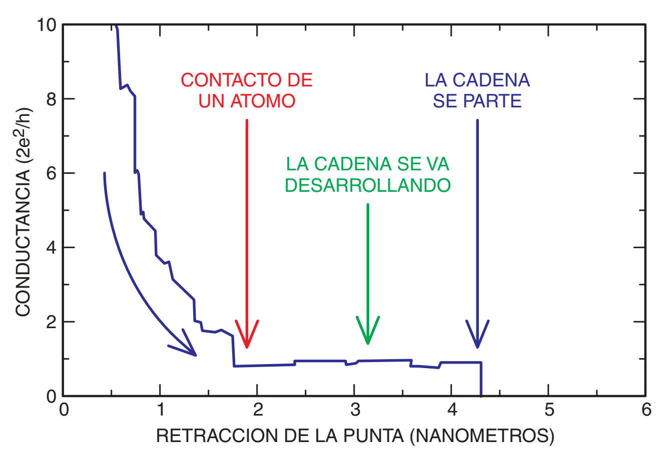
Por ser ligerísimas las fuerzas que nos interesaba medir, la deformación que producían en el fleje era asimismo mínima, de billonésimas de metro, lo que exigía un sistema de detección sumamente sensible, un microscopio de efecto túnel, situado sobre el fleje.

La solución del experimento no iba a ser inmediata. El microscopio de fuerzas atómicas suele aplicarse a la obtención de imágenes topográficas de una superficie con alta resolución, respetando la integridad de la muestra. De ahí que se emplee un fleje o sensor de fuerzas "blando", para que, si la punta toca la superficie, los átomos no se muevan de sitio, sino que sea el fleje el que se doble.

A nosotros no nos preocupaba dañar la superficie, sino modificarla para crear el contacto monoatómico. Por tanto, el fleje debía ser bastante más "duro" de lo habitual. Pero ello tenía su inconveniente. Para una fuerza dada, la deformación sufrida por el fleje era inversamente proporcional a su dureza, lo que exigía que la medición de aquélla debería ser aún más precisa.

Tras algunos intentos fallidos, construimos un microscopio combinado de efecto túnel y fuerzas atómicas, que nos iba a permitir provocar el contacto monoatómico, estudiar el transporte de electrones a través del átomo y medir simultáneamente las fuerzas entre los átomos durante todo el proceso. El microscopio presentaba, además, una estabilidad excepcional, merced a lo cual podíamos mantener inalterado el contacto monoatómico durante horas para su estudio.

Dada la ductilidad característica del oro, cabría esperar que el "estiramiento" del contacto para contar con un solo átomo fuera un proceso continuo. Pero observamos que la fuerza que debíamos aplicar durante la formación del contacto monoatómico variaba de una manera discontinua. Volvíamos a encontrarnos con una situación en la que, en razón de la escala mínima de la estructura material, el sólido no podía considerarse un



6. LOS AUTORES se percataron de que quizás estaban fabricando una cadena de átomos cuando, a partir de un contacto de un solo átomo, podían seguir separando los electrodos sin que se perdiera el flujo eléctrico, que seguía presentando una conductancia de un solo cuanto ($2e^2/h$).

continuo; antes bien, se manifestaba su estructura "granulosa" (formada por átomos).

Durante el proceso mecánico de deformación observamos que, al darse una pequeña retracción de la punta (uno de los electrodos), se producía una deformación elástica reversible del contacto; dicho de otro modo, si se relajaba la fuerza aplicada la estructura tornaba al punto de partida. Pero si se sometía el contacto a una deformación mayor, la estructura se volvía inestable y se asistía a una reorganización súbita de los átomos (algunos cambiaban de posición) en un tiempo muy corto.

Tras esta reestructuración irreversible, se relajaba la tensión acumulada en el contacto. La nueva estructura atómica podía someterse otra vez a deformación elástica hasta que la estructura acabara por ceder y adquiriera nueva forma. De esta manera, para llegar al contacto de un solo átomo a partir de un contacto mayor, éste seguía una secuencia discreta de etapas de deformación elástica, separadas por relajaciones súbitas de la tensión mecánica debido a las reestructuraciones atómicas sufridas.

Una vez perfilada la descripción cualitativa del proceso, pasamos a la determinación cuantitativa de la magnitud de las fuerzas implicadas. Obtuvimos un resultado que nos extrañó al principio: la magnitud de la fuerza necesaria para deformar el contacto era mucho mayor (nada menos que 20 veces más) que el valor predicho por la teoría en el caso de la deformación plástica de un sólido.

La sorpresa se disipó al percatarnos de que esta teoría valía para sólidos macroscópicos, en los que la deformación plástica está determinada por el movimiento de las dislocaciones experimentadas en el material. Mas como el nanocontacto ofrecía unas dimensiones tan pequeñas, la presencia de dislocaciones hubiera constituido un derroche energético, y por eso los átomos se ordenaban en una disposición cristalina. Ahí se escondía la razón de que no pudiéramos aplicar el conocimiento del proceso de deformación plástica de materiales macroscópicos al caso que nos ocupa.

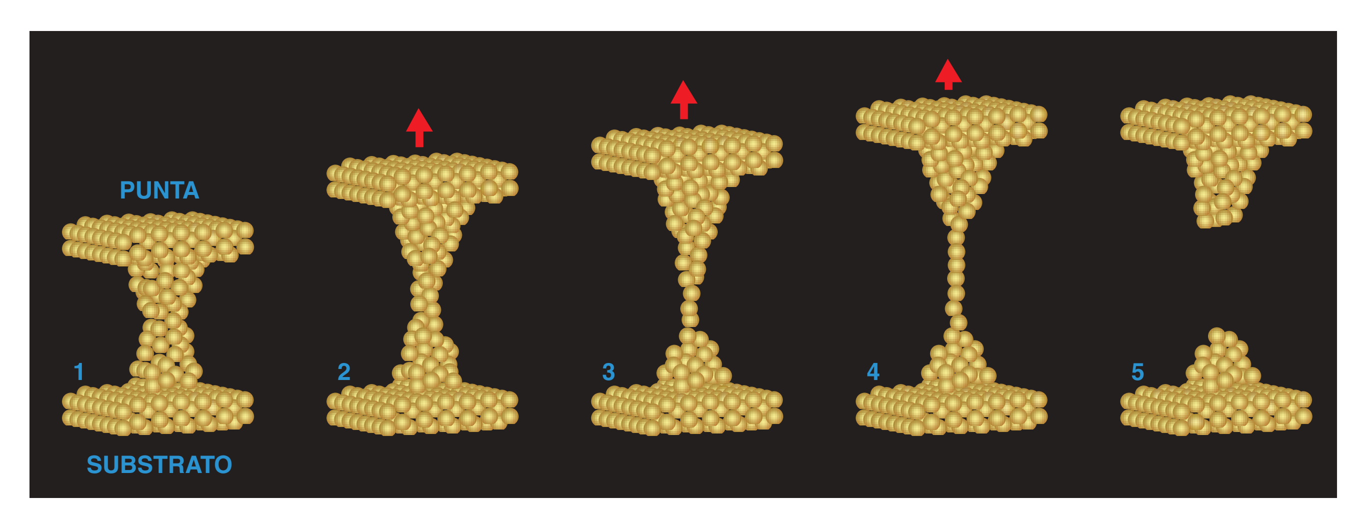
7. LA CADENA de átomos se encuentra suspendida entre dos electrodos. Es posible mantenerla en esa situación incluso durante horas, si el experimento se lleva a cabo a bajas temperaturas. La imagen es el resultado de un cálculo de dinámica molecular realizado por K. W. Jacobsen y M. R. Sørensen, de la Universidad Técnica de Dinamarca.

Había, pues, que echar mano de otro recurso teórico. Y éste eran los principios de deformación de un sólido ideal, es decir, un sólido en el que los átomos se encuentran ordenados en sus posiciones de equilibrio energético. Esa base teórica sí explicaba la magnitud de la fuerza a emplear durante el proceso de fabricación del contacto monoatómico.

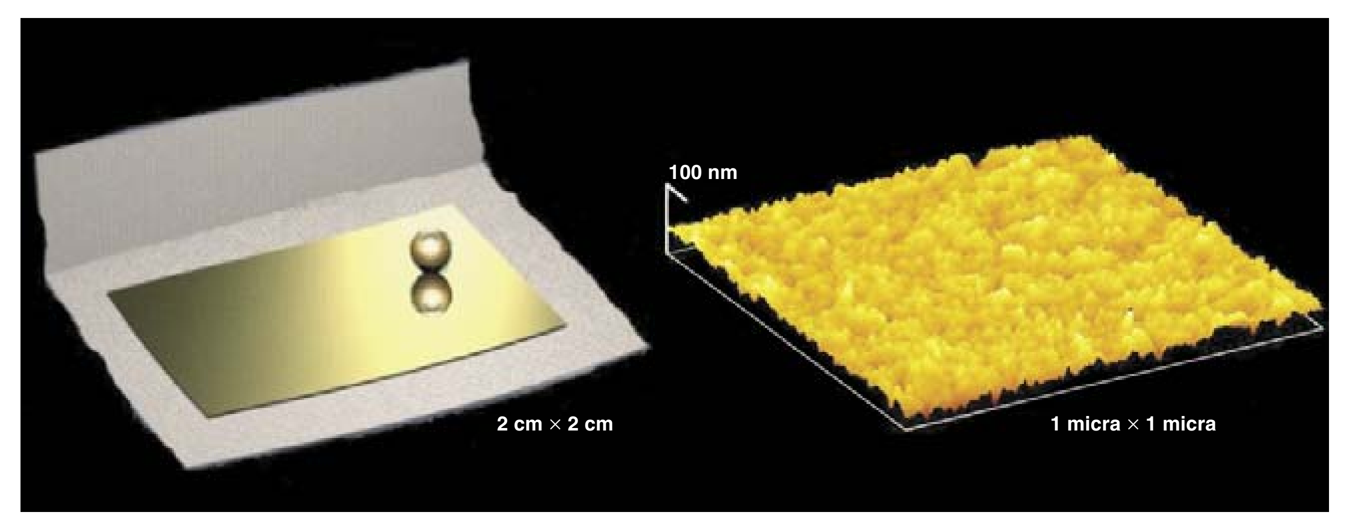
Nanotribología

Alguien podría objetar que las leyes mecánicas que dan cuenta de los procesos de deformación de un sólido nanoscópico se hallan muy alejadas de nuestra vida cotidiana. Sin embargo sabemos que aun cuando la superficie de un sólido parezca lisa, a la escala de los átomos acostumbra presentar una gran rugosidad.

Semejante relieve significa que la superficie de contacto entre dos cuerpos, que a simple vista se diría continua, se compone en realidad de una multitud de microcontactos. De



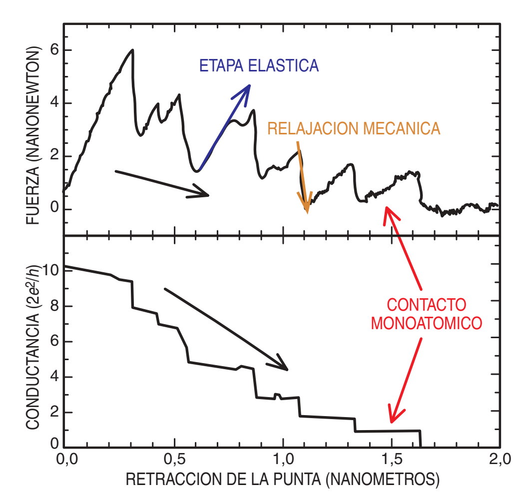
8. SIMULACION de dinámica molecular del proceso de formación de una cadena de átomos de oro, a partir de un contacto nanoscópico, conforme se va separando la punta del substrato. Cuando la cadena se rompe, la estructura se torna inestable y los átomos que la componen colapsan sobre los electrodos. (Cálculos realizados por K.W. Jacobsen y S.R. Bahn.)



9. LA NANOTRIBOLOGIA se ocupa de explicar fenómenos mecánicos macroscópicos —como la fricción y el desgaste— a partir de lo que sucede a escala nanométrica. Así, por ejemplo, una superficie espejada de oro, lisa, evidencia su relieve irregular cuando la observamos bajo un microscopio de fuerzas atómicas. De igual modo, la superficie de contacto entre dos cuerpos macroscópicos, que puede parecer continua, está en realidad compuesta por multitud de microcontactos.

eso se infiere que determinados fenómenos de interés técnico, industrial y básico —fracturas, rozamientos y erosiones o desgastes— sólo pueden entenderse a partir del conocimiento de la mecánica a escala nanométrica. Se trata de un campo de la física muy activo, que comenzó a principios de los años noventa y que recibe el nombre de nanotribología (del griego "tribos", rozamiento, desgaste). Esta ciencia aborda los fenómenos mecánicos macroscópicos a partir de sus mecanismos nanoscópicos.

El rápido desarrollo de la nanotribología se sustenta, por una parte, en la aparición de nuevas técnicas experimentales para el estudio de sistemas de dimensiones nanoscópicas (microscopios de efecto túnel y fuerzas atómicas) y, por otra, en la aparición de técnicas de computación cada vez más rápidas y eficientes. En este sentido, ha surgido una nueva forma de avanzar en la nanotribología: la simulación por computador del comportamiento que siguen los átomos en sólidos y líquidos. En estos cálculos de dinámica molecular se establece el potencial de interacción entre los átomos, que se colocan en determinadas posiciones iniciales, y se sigue el movimiento de los mismos según las leyes de la dinámica.



10. LA FUERZA APLICADA durante la formación de un contacto monoatómico de oro, a partir de un contacto inicialmente compuesto por algunas decenas de átomos, no es constante. A medida que se estira la estructura, la fuerza de tracción sigue una secuencia de etapas elásticas, separadas por súbitas reestructuraciones de algunos átomos del contacto, durante las que la tensión acumulada se relaja. A lo largo del proceso de deformación, la corriente que circula a través del contacto se reduce de una forma discontinua.

Se necesitan para ello computadores de una notable potencia de cálculo. En cada fase de la simulación hay que calcular las interacciones mutuas entre todos los átomos de partida (miles, quizá).

Hoy, los experimentos y las simulaciones de dinámica molecular corren en paralelo. Unas veces, los cálculos predicen una situación que luego se somete a comprobación experimental; otras, la iniciativa la lleva el experimento y son los cálculos los que simulan con posterioridad el proceso. El descubrimiento de la cadena de átomos pertenece al segundo camino. Con la ventaja añadida de que los modelos teóricos encontraban antes dificultades para justificar la formación de esta estructura, considerada inestable.

Cuando Feynman escribía sus reflexiones sobre la transcendencia del hecho atómico, era difícil imaginar la situación alcanzada, actualmente, en que el manejo de los átomos individuales nos faculta para la construcción de filas de átomos de oro. Cabe suponer que, en un futuro no muy lejano, dispongamos de herramientas cuya manipulación nos permita fabricar, átomo a átomo, estructuras de complejidad creciente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATOMIC-SIZED METALLIC CONTACTS: MECHANICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC TRANSPORT. G. Rubio Bollinger, N. Agraït y S. Vieira en *Physical Review Letters*, vol. 76, páginas 2302-2305; 1996.

THE SIGNATURE OF CHEMICAL VALENCE IN THE ELECTRICAL CONDUCTION THROUGH A SINGLE-ATOM CONTACT. E. Scheer, N. Agraït, J. C. Cuevas, A. Levy Yeyati, B. Ludoph, A. Martín-Rodero, G. Rubio Bollinger, J. M. van Ruitenbeek y C. Urbina en *Nature*, vol. 394, páginas 154-157; julio 1998.

FORMATION AND MANIPULATION OF A METALLIC WIRE OF SINGLE GOLD ATOMS. A. I. Yanson, G. Rubio Bollinger, H. E. van den Brom, N. Agraït y J. M. van Ruitenbeek en *Nature*, vol. 395, páginas 783-785; octubre 1998.

El kayac de las islas Aleutianas

Los aleutianos usaban la baidarka para cazar en alta mar. Algunas particularidades de este kayac, de forma muy refinada, no se comprenden todavía

George B. Dyson



Cuando los rusos arribaron a las islas Aleutianas y costa de Alaska, en el siglo XVIII, encontraron las aguas llenas de embarcaciones pequeñas, veloces y de proa bífida. Les dieron el nombre de "baidarkas". Hechas de piezas de madera encontradas a la deriva, cosidas con fibras de ballena y forradas con piel de mamífero marino, estas embarcaciones, ligeras y flexibles, eran auténticos seres marinos. Los aleutianos las impulsaban a gran velocidad en aquellas pérfidas aguas, usándolas para cazar ballenas, nutrias de mar, leones marinos, focas y otros mamíferos con dardos, lanzas y arpones de mano.

Con el tiempo, sin embargo, la "baidarka" fue variando de forma, adaptándose a las necesidades de los recién llegados. Algunas —incluida cierta versión de manga reducida, proa bífida abierta y capaz de alcanzar una gran velocidad— dejaron de existir. Como la técnica de construcción fue durante mucho tiempo de transmisión oral, los modernos estudiosos de la materia, piragüistas y aleutianos tienen infinidad de dudas acerca de ellas. ¿Qué velocidad alcanzaban las primeras "baidarkas"? ¿Por qué tenían la proa bífida y la popa truncada? ¿Poseían los aleutianos unos criterios de diseño intuitivos que se les escapan a los ingenieros y matemáticos de hoy en día?

Aunque el número de "baidarkas" antiguas es ahora harto exiguo, se conservan algunos bocetos de doscientos años atrás, descripciones en diarios e historias orales, que, unidas a las piezas originales que persisten, han hecho posible la reconstitución de esas embarcaciones.



1. CAZADORES ALEUTIANOS navegan en "baidarkas" frente a la costa de Unalaska. Esta litografía —hecha en 1827 por Friedrich H. von Kittlitz, que iba a bordo de la balandra *Seniavin*, de la marina rusa— muestra dos cazadores; el de la derecha sostiene en el agua la pala con que gobierna la embarcación, llevando en la otra mano la lanza.



2. HUMERO de un cazador aleutiano (*debajo*), más largo y robusto que el de un ruso que no usaba kayac (*arriba*). La rugosidad del primero pone en evidencia que el número de fijaciones del músculo es mayor que en el segundo. Una masa muscular grande, típica de los cazadores aleutianos, explica la enorme fuerza y resistencia que poseían, y gran velocidad que imprimían al kayac, algunos de los cuales paleaban largas distancias desarrollando ocho o nueve nudos.

Así, a partir de aquellos datos, el autor y otros —entre ellos, alumnos de escuelas de las islas Aleutianas y Kodiak— han recreado la forma, de por sí complicada, y las características de la "baidarka", aunque muchos de sus detalles se mantienen oscuros, y es posible que nunca lleguemos a conocerlos. No obstante, ha quedado claro que el kayac se adaptaba perfectamente a la mala mar y al recorrido de grandes distancias que los aleutianos solían realizar, pues poseía unas peculiaridades muy adecuadas para reducir los efectos de la resistencia del agua y alcanzar la máxima velocidad.

Las islas Aleutianas ocupan un arco de 1500 millas de extensión entre la península de Kamchatka, perteneciente a la antigua Unión Soviética, y la costa de Alaska, haciendo de frontera entre el cálido océano Pacífico y el frío mar de Bering; ese contraste da lugar a la formación de niebla y tormentas que descargan su ira en las montañas volcánicas y los estrechos entre islas, donde los efectos de las mareas son notables. Pese al clima relativamente suave, con una temperatura media de 4,5 ºC, y una latitud similar a la del Reino Unido, en ninguna de las islas crecen árboles, a causa del viento que sopla sin cesar.

Unos 15.000 años atrás, a fines de la última era glacial, las islas Aleutianas eran mayores. Los hielos reducían el volumen del agua de mar, extendiéndose la cadena de islas y el estrecho de Bering hacia el norte. El estrecho actual era entonces una superficie de tierra de 1600 kilómetros de ancho. Cuando el clima cambió y los glaciares empezaron a fundirse, las aguas del océano inundaron la zona, produciendo una elevación del nivel del mar de unos 90 m, lo que ocurrió con gran rapidez entre 12.000 y 8000 años atrás.

Vida fuera del mar

Aunque nadie puede asegurar cuándo llegaron los aleutianos, el registro arqueológico señala que habitaron Anangula, junto a la isla Umnak, en las Aleutianas orientales, y en la isla Hog, en la bahía de Unalaska, hace 9000 años, como mínimo. Si vinieron caminando a través del puente de tierra existente en el estrecho actual de Bering o lo hicieron con kayacs o embarcaciones de forro de piel de otro tipo es probable que nunca logremos aclararlo. Lo cierto es que llegaron. Y las pruebas arqueológicas encontradas en Anangula ratifican que estaban perfectamente equipados para cazar mamíferos marinos hacia el 7000 a.C.

Según ha puesto de manifiesto William S. Laughlin, profesor emérito de antropología de la Universidad de Connecticut, la necesidad de cazar en el mar llevó a los aleutianos a "moverse con gran rapidez en barcos muy manejables". Los dos elementos principales de la técnica de los aleutianos —casas semisubterráneas y embarcaciones semisumergibles— eran aptos para soportar el viento incesante. Las islas estaban suficientemente separadas para que hubiera kayacs de diversos tipos y de evolución conjunta. Como la distancia que las separaba no era muy grande, el cruzamiento y la

3. LAS ISLAS ALEUTIANAS son ásperas y barridas por los vientos. No es cómoda la vida en ellas. Los aleutianos, adaptados a ese ambiente, construían sus casas bajo tierra para evitar la furia del viento, como puede apreciarse en esta acuarela de Unalaska pintada por John Webber en 1778. Las "baidarkas", de poca altura de borda, estaban concebidas para reducir al mínimo los efectos de las rachas de viento en mar abierto.





4. LAS ISLAS Aleutianas forman una cadena que se extiende desde Alaska hasta Rusia. Las islas volcánicas de este archipiélago debieron de ser pobladas primeramente por colonizadores llegados por mar en embarcaciones con forro de piel o por nómadas que lo hicieron a pie a través del puente de tierra del estrecho de Bering hace 15.000 años. Durante la última época glacial, el estrecho de Bering era una franja de tierra de 1600 kilómetros de ancho.

transferencia mutua de los progresos fueron constantes, de modo que las mejoras en las formas se difundieron presto entre ellas.

Los comerciantes rusos, que llegaron de Kamchatka y Okhotsk en barcos desvencijados y mal equipados, no tardaron en reconocer la superioridad técnica de los aleutianos. A los kayacs les dieron el nombre genérico de "baidarkas" y, apoderándose de los existentes, establecieron un monopolio sobre la construcción de nuevas unidades; homogeneizaron la forma de origen aleutiano, aumentaron las dimensiones y, en algunos casos, añadieron una tercera escotilla que facilitó el empleo a inexpertos. Con esto se hicieron con casi toda la caza de nutrias de mar, por cuyas pieles los chinos pagaban una fortuna. Bajo los auspicios de la Compañía Ruso-Americana, que consolidó la administración de las colonias de Alaska en 1799, flotas que alcanzaban hasta las 700 "baidarkas" recorrían cada año desde las Aleutianas e isla Kodiak hasta la costa sudeste de Alaska, cercando y aniquilando poblaciones enteras de nutrias de mar.

A principios de 1800, con una captura anual que alcanzaba las 10.000 nutrias de mar, la extinción de la especie era inevitable. Se tomaron algunas medidas de conservación, considerablemente aumentadas cuando Estados Unidos adquirió Alaska, en 1867. Se impuso un sistema de caza limitada hasta que, en 1911, el gobierno impuso la veda total. La mejor ocupación de las "baidarkas" aleutianas llegó a su fin y, con ello, el interés por esas embarcaciones. Los aborígenes, sin embargo, siguieron construyéndolas y usándolas hasta que fueron desplazados del lugar, durante la Segunda Guerra Mundial, cuando fueron asentados en emplazamientos temporales en el sudeste de Alaska por el gobierno norteamericano o hechos prisioneros por los invasores japoneses. Unas pocas "baidarkas" —y los conocimientos necesarios para hacerlas— seguían vivos al ser autorizados los aleutianos a regresar a su región de origen.

La ventaja de la "baidarka" para los rusos —y en contra de ellos al inicio de las hostilidades— fue su velocidad. De acuerdo con las observaciones de navegantes europeos —cuyas vidas dependían, ante todo, de la percepción exacta de la situación y su registro— las "baidarkas" podían navegar contra las corrientes más intensas de la región, que alcanzan unos seis nudos y medio. (Desarrollar la velocidad de un nudo significa hacerlo a una milla marina, 1852 m por hora.)

"Estábamos navegando con contracorriente de más de seis nudos, pero... los indios en sus canoas de piel se mantenían a nuestro lado con toda facilidad", escribió James Trevenen, guardiamarina del *Resolution*, uno de los barcos del capitán James Cook, al adentrarse la expedición en el paso de Unalga, en junio de 1778. Otro observador apuntó en 1820 que un buque navegando a siete nudos y medio fue rebasado fácilmente por "baidarkas" cargadas de bacalao.

Velocidad y esfuerzo

Es imposible deducir si esas velocidades tan elevadas procedían del diseño de las "baidarkas", del conocimiento por los aleutianos de las corrientes locales o simplemente del esfuerzo de quien las impulsaba. Los cazadores se distinguían por la extraordinaria robustez de la parte superior del cuerpo. Laughlin recuerda que Steve Bezezekoff, un cazador de la isla Umnak, probó un dinamómetro —un instrumento destinado a medir la fuerza mecánica— y lo hizo con tanto empeño, que lo rompió.

Los huesos de los cazadores atestiguan también su fuerza. Laughlin indica que un húmero excavado en 1950 es el mejor ejemplo de la mayor rugosidad jamás observada en seres humanos. La rugosidad es simplemente el conjunto de estriaciones formadas en la parte del hueso donde se fijan los músculos. "Cuando la gente practica mucho el kayac", explica Laughlin, "debe poder apreciarse en sus esqueletos, como realmente ocurre." Las marcas largas y profundas de los huesos de los brazos de los cazadores aleutianos indican que esos hombres desarrollaban más masa muscular que la mayoría. Esa gran musculatura, a su vez, indica que los aleutianos poseían una fuerza extrema, y que algunas partes del músculo estaban en activo mientras las restantes se mantenían en descanso, aun en el caso de que el palista no redujera o cesara el esfuerzo.

La resistencia de una persona no depende solamente del músculo, sino también de los sistemas respiratorio y circulatorio. Todo parece indicar que los aleutianos poseían la aireación pulmonar y la circulación sanguí-

nea necesarias para palear rápidamente durante mucho tiempo. Iván Evseevich Veniaminov —misionero y uno de los primeros etnólogos de Alaska— describió a principios de 1800 la proeza de un mensajero aleutiano que navegó 135 millas por alta mar en unas 27 horas, falleciendo de una hemorragia de pecho poco después de haber llegado.

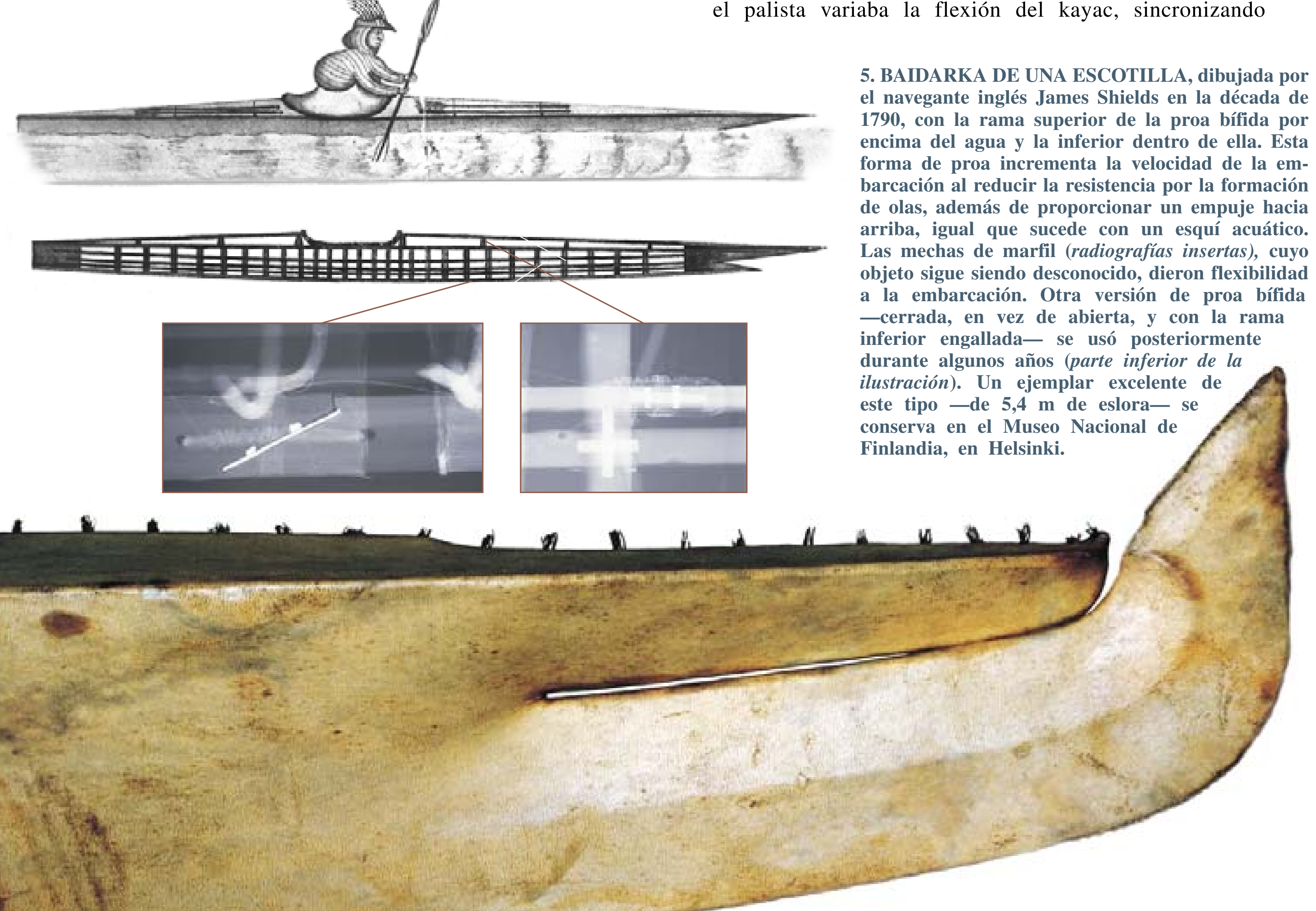
El kayac tomó una forma nada usual para aprovechar la fuerza y el aguante de los aleutianos, con una estructura elástica adecuada para resistir los efectos de la mar. Esa flexibilidad llamó la atención de los rusos, al igual que su velocidad. "Al principio me disgustaron esas canoas de piel a causa de su facilidad de flexión en el agua", escribió Urey Lisiansky, un capitán de la marina rusa, al término de un viaje de 300 millas en una "baidarka" en 1805. "Pero una vez me acostumbré, me di cuenta de que eran muy cómodas."

Esa flexibilidad procedía, en parte, de las mechas de fijación hechas de marfil, llamadas *kostochki* por los rusos, que llevaban las "baidarkas" primitivas. Varios años atrás, Joseph Lubischer, Chris Cunningham y yo fuimos autorizados a examinar unos *kostochki* de una "baidarka" recogida en Unalaska en 1826. Los rayos X revelaron la existencia de esas mechas flexibles de marfil en muchas de las uniones. Descubrimos también una tira delgada de ballena dispuesta entre la quilla y las cuadernas a lo largo de toda la eslora de la embarcación, sin que sepamos aún su objeto.

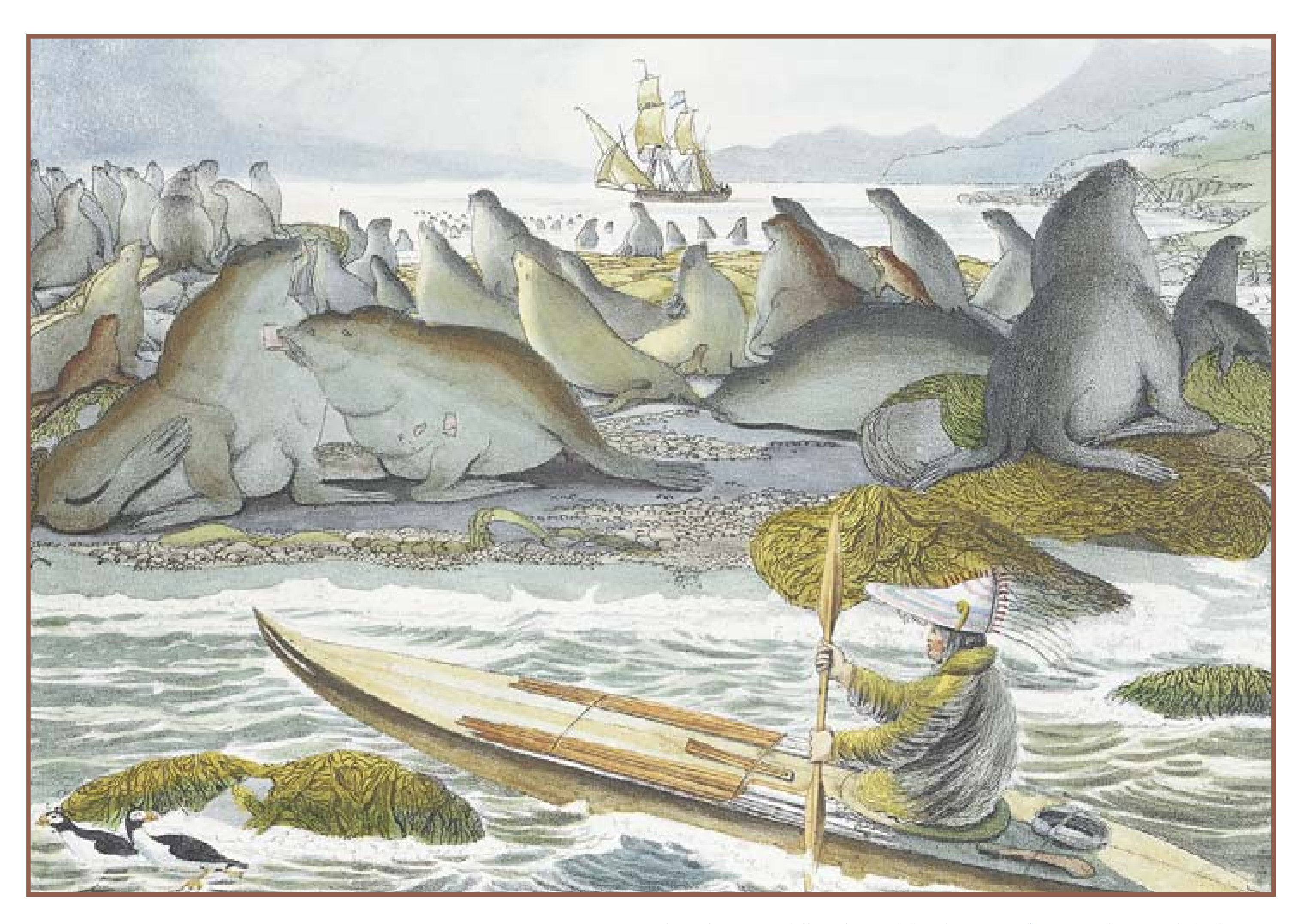
La mayoría de las "baidarkas" primitivas —y otras más recientes— tenían la quilla hecha de tres piezas capaces de extenderse y contraerse libremente, permitiendo que todo el casco flexara, con una amplitud limitada por la rigidez de las regalas. En esto se aparta de la tradición normal de construcción de cualquier embarcación, pues la quilla, rígida, forma la espina dorsal del casco. En la "baidarka", por tanto, las características de la quilla le dan una flexibilidad parecida a la de un mimbre, en vez de hacerla rígida como un cajón.

A tenor de cierta hipótesis, no exenta de controversia, la flexibilidad dinámica de la "baidarka" produciría, a veces, una disminución de la resistencia, es decir, reduciría la energía total necesaria para abrirse paso entre las olas en contra. Una forma fácil de entender esta idea es considerar que la energía de las olas se transforma en movimiento elástico de todo el esqueleto de la embarcación. Un kayac flexible navegando con oleaje vibra de acuerdo con el período aparente de las olas. El modo más simple de vibración se denomina oscilación vertical de dos nodos: los extremos del kayac se desplazan hacia arriba, mientras el centro del mismo lo hace hacia abajo, de forma alternativa. Sólo los nodos permanecen inmóviles. La oscilación depende de la distribución de la masa a bordo y viene condicionada por las olas que inciden contra la embarcación. Las oscilaciones desfasadas tienen el mismo efecto que los saltos que producen los baches o charcos de agua en un coche circulando a gran velocidad por una carretera.

Como el usuario del kayac no puede cambiar el período de las olas marinas, la única solución es la de adecuar la oscilación, o vibración, de la embarcación. Ciertos observadores de la expedición de Vitus Bering de 1741 explicaron que los kayacs de los aleutianos llevaban piedras de lastre a proa y a popa. Dado que los paleros expertos no necesitan lastre para la estabilidad transversal, es posible que la masa de esas piedras permitiera al tripulante igualar el período de la oscilación de los dos nodos a las condiciones de mar imperantes. En otras palabras, cambiando las piedras de posición, el palista variaba la flexión del kayac, sincronizando



5. BAIDARKA DE UNA ESCOTILLA, dibujada por el navegante inglés James Shields en la década de 1790, con la rama superior de la proa bífida por encima del agua y la inferior dentro de ella. Esta forma de proa incrementa la velocidad de la embarcación al reducir la resistencia por la formación de olas, además de proporcionar un empuje hacia arriba, igual que sucede con un esquí acuático. Las mechas de marfil (*radiografías insertas*), cuyo objeto sigue siendo desconocido, dieron flexibilidad a la embarcación. Otra versión de proa bífida —cerrada, en vez de abierta, y con la rama inferior engallada— se usó posteriormente durante algunos años (*parte inferior de la ilustración*). Un ejemplar excelente de este tipo —de 5,4 m de eslora— se conserva en el Museo Nacional de Finlandia, en Helsinki.



6. MAMIFEROS MARINOS, vistos aquí en las islas Pribilof, eran cazados por los aleutianos a poca distancia. Las “baidarkas” estaban hechas de suerte que pasaran inadvertidas, para que los cazadores pudieran acercarse a las presas sin espantarlas. Esta litografía de principios de 1800 muestra en el fondo un buque ruso, el *Rurik*. La llegada de los rusos cambió el modo de vida de los aleutianos y, a la postre, provocó la desaparición de ciertos tipos de “baidarkas”.

la ondulación del mismo a la frecuencia de las olas, y reduciendo así la energía con que debía impulsarlo. No se ha hecho ninguna prueba para corroborar la veracidad de esta hipótesis.

Resulta más difícil confirmar si la flexibilidad del forro de piel de la “baidarka” incrementaba la velocidad. La piel animal tiene una elasticidad no lineal, al revés de lo que sucede con cualquier otro material usado como forro de embarcaciones. Si una piel dúctil reduce la fricción y, con ello, la formación de las perturbaciones características en el límite del ámbito de un flujo turbulento es pura conjetura. La mayoría de los estudios —realizados para su aplicación en submarinos— se han dedicado a averiguar la incidencia de una superficie dúctil en el paso de un flujo laminar a turbulento. Se han obtenido magros resultados en el mejor de los casos. Pero ésta no es la cuestión en el caso del paleo de un kayac en una superficie turbulenta. La ausencia de un retraso significativo de la transición en dicho límite no impide los efectos favorables —además de ocultos— a unas velocidades y condiciones impropias para un flujo laminar.

Por otro lado, el darle máxima flexibilidad a la “baidarka” debió de ser la solución de los aleutianos a un problema puramente mecánico: el de mantenerla entera, sin deshacerse. La elasticidad estructural distribuye los esfuerzos locales a toda la embarcación, de modo que la estructura, dentro de los límites de la resistencia de los materiales empleados, caracterizados por su ligereza, no se rompa.

Además de por la velocidad y flexibilidad poco usual, la “baidarka” se distingue por su proa bífida. Algunas de las ahora llamadas versiones “antiguas” presentaban una gran abertura a proa, según aparece documentada en ilustraciones de la época de los primeros contactos, antes de 1800. Un boceto de la década de 1790, realizado por James Shields —constructor naval al servicio de los rusos— muestra una con la rama inferior de esa abertura bajo el agua y el vértice de ella justo a nivel de la superficie del agua. En versiones posteriores aparece también esa proa, pero con la rama inferior formando una curva con vuelta hacia arriba. Hay muchas hipótesis sobre la razón de la proa bífida; se ha sugerido incluso que se trataba de una representación simbólica de una nutria de mar o de una forma de camuflaje de la embarcación para no ser vista cuando se aproximaba a una presa.

Ciertas funciones de la abertura de la proa bífida son evidentes. La rama inferior corta perfectamente el agua, como un cuchillo, reduciendo las perturbaciones de la misma, cuando la embarcación avanza entre las



7. BAIDARKA RECONSTITUIDA por el autor en 1991, que desarrolló algo más de ocho nudos durante un recorrido de 800 metros, paleada por Greg Barton, ganador de una medalla de oro olímpica. El kayac es una versión moderna del dibujado por James Shields en la década de 1790.

olas. La rama superior actúa como un esquí acuático, produciendo una fuerza de elevación dinámica, que evita que el kayac cabecee en exceso.

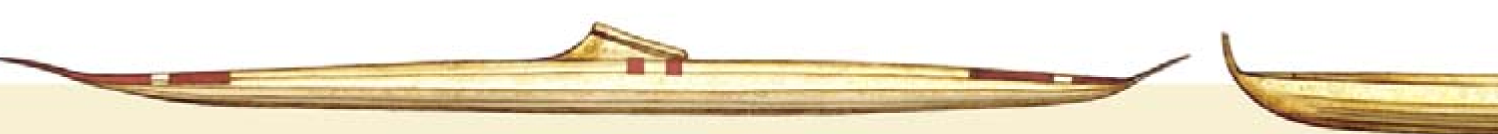
En condiciones favorables, la rama inferior, muy saliente, elimina los efectos de fase, lo mismo que hace el bulbo de proa que llevan algunos buques modernos. En el agua, un móvil con empuje hacia abajo produce una ola que empieza con una cresta, mientras que la generada por otro con empuje hacia arriba lo hace con un seno. Lo ideal es que ambos sistemas de olas se anulen entre sí, en cuyo caso se produce una notable economía de combustible a la velocidad de servicio. Pero en un kayac los beneficios son difíciles de evaluar.

La ventaja principal de la rama inferior de la proa muy saliente pudo ser su contribución al aumento de la eslora y fineza del casco. La velocidad de crucero varía en función de la raíz cuadrada de la eslora en la flotación, y la resistencia por la formación de olas lo hace a razón de la cuarta potencia de la relación entre la manga y la eslora. La rama inferior aumenta la eslora en la flotación sin incrementar la eslora total de la embarcación. El inconveniente de un casco de muy poca manga es su mala navegabilidad cuando hay oleaje. Pero la rama superior de la proa de una "baidarka" podía aliviar ese problema.

Pese a sus ventajas manifiestas, sorprende que esa forma de proa entrara en decadencia rápidamente cuando llegaron los rusos. ¿Era la velocidad de los kayacs una amenaza para los colonizadores, que sufrieron varias masacres ante los aleutianos bien equipados? O, como las correrías en busca de nutrias de mar se fueron haciendo cada vez más largas, ¿fue la proa bífida muy abierta un problema al quedar enredada en los lechos de algas? Ciertamente, la proliferación de grandes flotas de cazadores obvió la necesidad de persecuciones individuales a gran velocidad, de modo que los kayacs de poca manga y proa bífida abierta, hechos para desplazarse con rapidez y ser muy poco visibles, pero con escasa capacidad de carga, dejaron de ser necesarios.

Popa cuadra

La popa fina, cuadra y elevada de la "baidarka" fue un distintivo único, al igual que la proa; fue también una característica de ese modelo. Aquí nos



De la piel de foca al plástico

La "baidarka" fue uno de los modelos de kayac usado por los pueblos esquimal, inuit y otros que habitaban las regiones árticas que se extienden de Siberia a Groenlandia. La población koryak de Kamchatka, por ejemplo, construía embarcaciones de poca eslora y bastante manga para el uso en aguas protegidas. Los kayacs del delta del Mackenzie, en el noroeste del Canadá, tenían la proa y popa en punta y vuelta hacia arriba; se empleaban para cazar y, a veces, para calar redes de pesca. En el centro del Canadá, donde las vías de emigración de los caribúes cruzan ríos y lagos, los copper y netsilik, pertenecientes al pueblo inuit, los hacían muy finos y ligeros para alcanzar rápidamente los animales mientras nadaban. Y los de la bahía de Hudson e isla Baffin, al nordeste del Canadá, eran mangudos, pesados, con proas altas y bañera elevada, para que fueran estables y pudieran llevar mucho peso.

Hoy, el tipo de kayac más familiar es el de Groenlandia. Inicialmente era una embarcación de cazadores: de poca manga y maniobra fácil, tenía una cubierta muy baja y graciosamente curvada hasta los extremos de proa y popa, que terminaban en punta ligeramente elevada. Este modelo, muy atractivo, es el que ha ejercido mayor influencia en el proyecto de los kayacs actuales, aunque las unidades modernas no conservan casi nada del uso, materiales y sistema de construcción utilizados por los aborígenes.

Pese a que los kayacs se usaron durante siglos, por no decir milenios, su aplicación deportiva es bastante reciente. En 1866 John MacGregor publicó el primero de sus relatos de paseos con kayac. El primer empuje hacia la práctica de la navegación con kayac surgió en Occidente, después de 1907, cuando Hans Klepper inició la producción en masa de un modelo plegable. La embarcación iba en una bolsa que cabía en el estante para maletas de los vagones de tren, facilitando el traslado al lugar de práctica de la afición, por parte de la nueva clase media urbana.

Después de la gran depresión y la segunda guerra mundial el uso del kayac deportivo decayó. La mano de obra especializada en embarcaciones de ese tipo hacía que el precio fuera elevado. De todos modos, los entusias-

GEORGE DYSON inició la construcción de kayacs en 1964. Vinculado ahora a la Universidad de Western Washington, es autor de *Baidarka* (1986) y *Darwin among the Machines* (1997).

hallamos en mejores condiciones de aclarar la razón y el objeto de dicha forma. Cuando un kayac avanza, la proa divide la superficie del agua, que se desplaza dejando paso al casco y luego vuelve a su posición de equilibrio inicial a popa de la embarcación, de modo que la energía aplicada por el palista se disipa en la estela. La distancia que requiere el agua para volver a la condición de equilibrio inducido por gravedad es igual a la longitud de una ola de superficie que se desplaza a idéntica velocidad que la embarcación.

A una velocidad específica —llamada a veces velocidad del casco— el kayac produce una ola de longitud igual a la eslora del mismo. Por debajo de esa velocidad el agua vuelve a la condición de equilibrio, suavemente y a lo largo del casco, en cuyo caso hay una zona de baja resistencia a popa, siendo esta cabeza muy fina. Por encima de aquella velocidad, sin embargo, el agua desplazada no es capaz de volver a su condición de equilibrio a lo largo del kayac y en vez de ello tiende a separarse del casco, produciendo una succión y una gran resistencia en el extremo posterior de la embarcación.

A medida que el kayac aumenta de velocidad, el seno del sistema de olas generado se desplaza hacia popa y esta cabeza tiende a sumergirse en el agua, exagerando los efectos indicados al final del párrafo anterior. Para evitar la inmersión de la popa y retardar la perturbación del flujo del agua —favoreciendo que se produzca con suavidad— la superficie de la sección transversal de la popa de un kayac de andar muy elevado debe tener una forma aproximada a la de una curva de longitud igual a la de la ola que se desplaza con la misma velocidad que la embarcación. Y la parte posterior de la embarcación debe terminar "de forma brusca", por seguir la descripción que hizo el capitán Cook de la popa de una "baidarka". En razón de ello, esa forma de popa es usual en las embarcaciones de gran velocidad, tanto a motor como a vela. De todos modos es rara en kayacs, salvo en las "baidarkas".

Aunque no podemos saber lo que se movía en la mente de los cazadores aleutianos que proyectaron y mejoraron esta embarcación tan destacada a lo largo de milenios, la "baidarka" sigue siendo el apogeo del diseño del kayac. De proa a popa —y de su estructura a su forro exterior— la "baidarka" evolucionó de acuerdo con las leyes de la hidrodinámica. El misterio del kayac aleutiano no se debe a sus principios desconocidos, sino al hecho de ser una solución coherente de los problemas que le afectan. Y es evidente que las observaciones de Veniaminov en 1840 continúan siendo válidas: "Me parece que la 'baidarka' de los aleutianos es tan perfecta dentro de su especie, que ningún matemático podría añadir nada o muy poco para mejorar sus cualidades."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ALEUTS: SURVIVORS OF THE BERING LAND BRIDGE. William S. Laughlin. Holt, Rinehart and Winston, 1980.

BAIDARKA: THE KAYAC. George Dyson. Alaska Northwest Books/Graphic Arts Center, 1986.

CONTRIBUTIONS TO KAYAC STUDIES. Dirigido por E. Y. Arima. Canadian Ethnology Service, Mercury Series, publicación n.º 122. Canadian Museum of Civilization, 1991.

THE ALEUTIAN KAYAC. Wolfgang Brinck. Ragged Mountain Press, 1995.



tas siguieron experimentando con modelos y materiales. La fibra de vidrio se popularizó, y el uso fluvial del kayac alcanzó un nivel muy alto. Entonces, algunos modelos groenlandeses antiguos sirvieron de inspiración a otros originales y de uso marino.

A mediados de los años ochenta, la implantación de un nuevo método de manufactura popularizó otra vez la navegación. Una técnica en la que se vierte el plástico en el interior de un molde giratorio (*rotomolding*) permitió hacer kayacs muy baratos y duraderos.

Las embarcaciones nuevas de plástico, de colores muy vistosos, muestran un lejano parecido con algunas versiones de kayacs groenlandeses, y son los últimos descendientes de los modelos de madera recogida a la deriva, mechas de marfil y forro de piel de foca.

—Dan Schlenoff, de la redacción

LOS KAYACS DE LOS INUIT Y ESQUIMALES contrastan con los modelos modernos de fabricación en serie. De izquierda a derecha aparece uno para la caza de caribúes, con partes pintadas, de Canadá central; otro del delta del Mackenzie, al noroeste del Canadá, usado para calar redes de pesca en 1914; y un tercero del sudoeste de Groenlandia, construido en 1883. Aquí debajo vemos uno moderno de polietileno, hecho con molde, y de escotilla abierta.



PERFILES

Alden M. Hayashi

BRIAN GREENE: las cuerdas del universo

Brian Greene fue niño precoz. Nació en Nueva York en 1962, y se crió cerca del Museo Americano de Historia Natural. En los días lluviosos, el museo inmenso se convertía en su patio de recreo, pero Greene no era como los demás chicos de su edad. "A mí las exposiciones de dinosaurios, por impresionantes que fueran, nunca me entusiasmaron de verdad", confiesa. Lo que inflamó su pasión fue, por contra, el Planetario Hayden. "Siempre, desde que alcanzo a recordar, me pregunté de qué estaba hecho el universo y cómo acabó siendo lo que es."

Hoy, tres decenios más tarde, Greene trata todavía de responder a esas preguntas. Profesor de física y matemáticas en la Universidad de Columbia, es uno de los más destacados expertos mundiales en teoría de cuerdas, que pretende explicar el universo entero, sin excluir su origen y evolución. La teoría sostiene que toda la materia y todas las fuerzas se componen de lazos increíblemente finos, a la manera de cuerdas. Los lazos vibran según modos diferentes que corresponden a electrones, gluones, fotones y otras partículas fundamentales. A causa de su exhaustiva capacidad para describir cómo funciona todo, la teoría de cuerdas se ha convertido en la cuestión más excitante de la física teórica, y Greene se halla en el candelero en tanto que uno de sus más avezados expertos; se dice que su prestigio obscurece la fama del mismo Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.



Jugando en los campos de Bohr y Einstein: la investigación de Brian Greene sobre la teoría de cuerdas pretende unificar la mecánica cuántica y la relatividad general

Greene, lo hemos avanzado, ya apuntaba de pequeño. A los cinco años, fascinado por la potencia de las simples reglas de la aritmética, pasaba el tiempo multiplicando números de 30 cifras que su padre le escribía. Para que cupiesen los cálculos, pegaban hojas de papel para planos. En sexto curso había agotado los recursos pedagógicos de matemáticas de su escuela, lo que impulsó a uno de sus maestros a redactar una nota pidiendo ayuda. Greene y su hermana mayor llevaron la nota a la Universidad de Columbia. "Literalmente fuimos llamando a las puertas", relata. Al presentarse en el departamento de informática, encontró a Neil Bellinson, un doctorando que se ofreció a proporcionarle apoyo extraescolar gratuitamente.

Tras ese prometedor comienzo, Greene entró en la Universidad de Harvard en 1980, graduándose en física. Allí se enteró de que los dos pilares sobre los que se asienta la física moderna (la mecánica cuántica, que describe los átomos y las partículas subatómicas, y la relatividad general, que explica los fenómenos astronómicos, como los agujeros negros) son mutuamente incompatibles. "Es como si las leyes de lo pequeño y las leyes de lo grande estuviesen en conflicto entre sí", explica. Ha sido el secreto vergonzante de la física moderna. "El hecho de que las dos teorías no encajen entre sí no te lo enseñan", añade.

Pero no supo que existía un posible arreglo hasta que fue a la Universidad de Oxford con una beca Rhodes. Mediados los ochenta, los físicos acababan de domesticar algunos desmanes infortunados de la teoría de cuerdas, y la concepción experimentaba un vigoroso rebrote en tanto que unificadora de la mecánica cuántica y la relatividad general. Tras escuchar una conferencia sobre el tema, Greene se quedó encandilado. En su tesis escrutó una posible manera de obtener predicciones experimentalmente verificables a partir de la teoría de cuerdas. Continuó su trabajo en Harvard y más tarde en la Universidad de Cornell. En 1996 se volvió a Nueva York para poner en marcha un programa sobre teoría de cuerdas en Columbia, cerrando el círculo con la universidad que le había acogido de chico.

Manhattan parece el lugar ideal para Greene. Le gustan las prendas negras a la moda, y guarda un ligero parecido con David Schwimmer, el actor de la serie de televisión *Friends*, con su mismo encanto masculino y su cómico sentido de la oportunidad. Sólo unas briznas grises en su pelo crespo dejan entrever sus 38 años. Pero aunque Greene no tenga un aire de genio torpe y desmelenado, no por eso es menor su talla académica, profundo conocedor de los arcanos de la teoría de cuerdas.

Irónicamente, la belleza metafórica de la teoría (la imagen de un número no revelado de cuerdas vibrando en una sinfonía cósmica, todas orquestadas

por una sola y omnipotente ley de la física) esconde las sutiles matemáticas que entraña. La teoría de cuerdas requiere dimensiones adicionales del espacio (quizá siete) aparte de las tres comúnmente conocidas. Sus proponentes sostienen que las dimensiones adicionales están tan enrolladas, que no se pueden ver, del mismo modo que una manguera tridimensional parecería una línea unidimensional si se mirase de lejos. Para complicar las cosas, los investigadores han apuntado la posibilidad de que algunas cuerdas unidimensionales se estiren en membranas bidimensionales, que a su vez se pueden transformar en entidades de más dimensiones. Los físicos se ven obligados a inventar matemáticas complejas hasta lo indecible para describir este paisaje surrealista, siguiendo en ello el camino de Isaac Newton, quien tuvo que desarrollar el cálculo para elucidar cómo actúan las fuerzas sobre los objetos.

Una de las mayores contribuciones de Greene a la teoría de cuerdas tuvo lugar en 1992 mientras pasaba un año sabático en el Instituto de Estudios Avanzados. Junto con Paul S. Aspinwall y David R. Morrison, ambos de la Universidad de Duke, demostró cómo el tejido del espacio podía rasgarse y repararse a sí mismo, al menos según la teoría de cuerdas. Aunque puramente teórico, el trabajo era intrigante (la relatividad general veta las rupturas en el espacio-tiempo) y Witten, el decano de la teoría de cuerdas, había llegado independientemente al mismo resultado desde un enfoque diferente.

Lamentablemente, los desgarrones del espacio-tiempo están mucho más allá de lo que los físicos pueden confirmar o demostrar por vía experimental. De hecho, aún está por corroborar cualquiera de las dimensiones adicionales de la teoría, y no digamos la misma existencia las cuerdas. Pero Greene y otros físicos esperan con ansia el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), un enorme acelerador de partículas que se construye en el CERN, en las afueras de Ginebra. Si todo marcha según el plan, el LHC machacará protones uno contra otro con tal fuerza, que las colisiones crearán algunas de las hipotéticas "supercompañeras" (selectrones, sneutrinos, squarks y otras así) que predice la teoría.

Tal prueba podría haberse obtenido con el Supercolisionador Superconductor, si no fuera porque el congreso cerró el grifo de la financiación del ciclópeo acelerador de Texas. "Si hubiéramos construido ese artefacto, nuestra comprensión de las cosas hubiera dado un gran paso hacia delante", reconoce. Pero comprende la falta de apoyo popular a unas instalaciones que costaban miles de millones de dólares. "Creo que se tiene la impresión de que lo que estamos intentando averiguar son detalles esotéricos que sólo interesan a los físicos", se lamenta. Ese yerro es una de las razones por las que Greene escribió *The Elegant Universe*, un libro que gozó de gran acogida, donde explica el significado cósmico de las cuerdas y cómo podrían responder a algunas de las más profundas cuestiones de la humanidad.

Exquisitamente redactado en una lúcida prosa, el libro agotó tres ediciones en su primer mes, y Greene pronto cambió sus quehaceres. Sus insólitos dones para destilar conceptos esotéricos en términos asequibles —a la vez que su porte jovial y atractivo— le han convertido en el paladín de la física teórica. Los señuelos han sido numerosos: conferencias con audiencias a rebosar, entrevistas en televisión y hasta un papel secundario en una película. El analista político George Stephanopoulos, compañero suyo en Oxford, bromeaba diciendo que Greene, que es soltero, podría ser el primer físico en disponer de su clan de admiradoras.

Greene posee un don insólito para destilar conceptos esotéricos en términos asequibles.



Brian Greene en clase

Pero Greene, que siempre ha respondido a todos sus correos electrónicos hasta que su volumen se tornó ingobernable, no se ve divulgador a tiempo completo. Por ahora no entra en sus proyectos escribir un segundo libro. "Al escribir un libro se paga un precio en la investigación", confiesa, para añadir a renglón seguido que él siempre quiere permanecer en la primera línea de la física. "Necesito comprometerme totalmente con la investigación para saber de verdad lo que está pasando. Necesito saber todos los detalles, todas las sutilezas."

La subida de adrenalina es otro cebo. "Lo que me atrajo a la ciencia es la excitación del descubrimiento. No hay nada como el momento en que se da uno cuenta de que ha descubierto algo que previamente no se sabía." Su investigación actual concierne a la geometría cuántica, las propiedades del espacio a distancias extremadamente pequeñas, sobre la pretendida extensión de una cuerda típica, unos 10^{-33} centímetros (un átomo de hidrógeno mide unos 10^{-8} centímetros de ancho). En este ámbito, el espacio-tiempo ya no es suave y curvo, sino turbulento y espumeante.

Ese trabajo podría ayudar a determinar la verdadera esencia del espacio y del tiempo. "¿Cómo apareció el espacio? ¿Cómo nació el tiempo? ¿Hay algo más básico que el espacio y el tiempo?", se pregunta, refiriéndose al postulado de la teoría de cuerdas de que el espacio y el tiempo pudieran ser meras manifestaciones de algo más fundamental. Las respuestas a estas cuestiones podrían explicar por qué el tiempo, al revés que el espacio, parece correr sólo en un sentido: hacia adelante.

Estos y otros enigmas se podrían resolver más fácilmente si los investigadores conocieran la noción que sustenta la teoría de cuerdas. Para la relatividad general, ese principio clave era la curvatura del espacio-tiempo. Mientras que otras teorías se desarrollan de arriba abajo, comenzando con un concepto grandioso del cual fluyen luego las ecuaciones, es de notar que la teoría de cuerdas nació de abajo arriba. Para Greene, este vacío crucial en el conocimiento (¿cuál es el principio fundamental que haría que la teoría de cuerdas *debiera* ser correcta?) ha sido tan frustrante como seductor. "Es como si tuviéramos un cuadro de uno de los grandes maestros, pero que alguien hubiera venido y se hubiera llevado trozos del mismo. Con lo que queda, se puede decir que había allí una hermosa pintura, pero ahora lo que queremos es contemplar todo el cuadro. En eso es en lo que venimos trabajando".

El gen caudal

y la región posterior de los organismos

La mayor parte de los organismos se caracterizan por la posesión de estructuras diferenciadas en el eje anteroposterior. Los vertebrados, por ejemplo, poseen, en general, cabeza, tronco y cola. A pesar de la gran diversidad que existe en este eje cuando examinamos el ratón, la mosca o el gusano, la información genética que establece dichas diferencias presenta una base común.

Esta información genética la proporcionan los genes homeóticos (genes *Hox*). Todos los animales estudiados (incluido el ser humano) poseen un conjunto similar de genes *Hox*, el complejo homeótico (o complejo Hox), que puede darse hasta en cuatro copias, como en el ratón y el hombre, y contener hasta trece genes.

El complejo génico *Hox* presenta una peculiaridad: los genes están ordenados según la región del cuerpo que especifican; así, los genes de un extremo determinan la parte más anterior del cuerpo y los del otro extremo la más posterior, correspondiendo a los genes centrales las partes medias. Esta singular disposición, cuyo origen y significado se desconocen, se cumple en todos los animales en los que se ha analizado. Ello no obsta para que haya algunas diferencias en la estructura del complejo homeótico según los organismos de que se trate.

Descubiertos en *Drosophila melanogaster*, la mosca del vinagre, los genes homeóticos se han estudiado también en ella de forma más intensa. Diversos trabajos han permitido dibujar un mapa de correlación entre los genes *Hox* y las estructuras del embrión o adulto de *Drosophila* que especifican. En este mapa se observa que hay regiones cuyo desarrollo no parece requerir la actividad de ningún gen *Hox*, entre ellas la analia, la estructura epidérmica más posterior. Eduardo Moreno y Ginés Morata, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, han demostrado que el gen *caudal* (*cad*) es el responsable de la determinación de esta estructura.

Dos tipos de experimentos les llevaron a esta conclusión: en uno de ellos se observó que la eliminación del gen *cad* transforma la analia en el segmento anterior, la genitalia, mediante la activación del gen Hox *Abdominal-B*; en otra serie de experimentos se expresó ectópicamente el gen *cad*, observándose que era capaz de producir analia en distintas partes del cuerpo. La verdad es que el gen *cad* puede formar dos estructuras diferentes, la analia (parte epidérmica externa) y el intestino posterior. El que se produzca una u otra depende de la actividad de una vía de señalización regida por el gen *hedgehog*; si la vía de señalización se halla operativa, *cad* activa el gen *Distalless* y origina la analia; si no lo está, *cad* activa los genes *brachyenteron* y *even-skipped* y se forma intestino posterior.

El gen *cad* no pertenece al complejo *Hox* en ninguna de las especies estudiadas hasta el momento. Sin embargo, presenta varias de las características de los genes *Hox*: se expresa en una estructura definida (la analia), su ausencia da lugar a que se transforme la analia en un segmento anterior (la genitalia) y, cuando se expresa ectópicamente, es capaz de especificar analia en diferentes partes del cuerpo. Cumple, pues, varias de las características propias de los genes que determinan el eje anteroposterior. ¿Por qué no se encuentra, entonces, incluido en el complejo homeótico?

Moreno y Morata proponen que los genes *even-skipped* y *cad* provendrían de un solo gen en el complejo homeótico primitivo y que *cad*, pero no *even-skipped*, se habría separado del mismo. De hecho, *even-skipped* se halla en el complejo Hox de algunos organismos, aunque no en el de *Drosophila*. En *Drosophila*, y probablemente en otros insectos, *even-skipped* se habría separado del complejo homeótico y de su función se habría hecho cargo el gen *cad*. *Even-skipped* habría pasado a estar bajo el control transcripcional de *cad* y se ocuparía sólo de una parte de su dominio original (el intestino posterior).

El estudio de la función del gen *cad* en *Drosophila* es importante para la comprensión del desarrollo en otros animales, incluido el hombre. Existen genes homólogos a *cad* en otros organismos, como el gusano *Caenorhabditis elegans* o el ratón, y en todos ellos se requiere para la formación de las estructuras posteriores. En el pollo y el ratón, por ejemplo, se necesita para la formación del intestino posterior, al igual que en *Drosophila*. En el ratón hay tres genes homólogos al gen *cad* de *Drosophila*; las mutaciones en uno de ellos, *Cdx 2*, provocan con alta frecuencia cáncer de colon.

Se desconoce si los mecanismos por los que el gen *cad* forma la analia o el intestino posterior en la mosca son similares a los que producen el intestino posterior del ratón o el humano, pero *Drosophila* ha demostrado ser un excelente organismo para el estudio de múltiples problemas biológicos; de esa investigación en la mosca cabe esperar que aparezcan algunas claves importantes para comprender nuestro desarrollo y la formación de algunos tipos de cáncer.

BEATRIZ ESTRADA
y ERNESTO SÁNCHEZ-HERRERO
Centro de Biología Molecular, Madrid

lab-pb-Dfd-Scr-Antp -- Ubx-abd-A- Abd-B- --cad

Representación esquemática de los genes que componen el complejo homeótico en Drosophila *y su correspondencia con las estructuras a las que dan lugar en la mosca adulta* (la correspondencia se indica por colores). Cad, *que no forma parte del complejo, especifica la parte más posterior* (la analia)

Construcción medieval

Morteros de cal

Por norma, la restauración de una obra monumental debe realizarse con idénticos materiales a los empleados en la construcción originaria. Ese criterio sirve para los morteros medievales. Con este principio, se logrará crear un todo homogéneo que reaccione de igual manera a fenómenos de deterioro posteriores y evite tensiones generadas por la mezcla de distintos materiales.

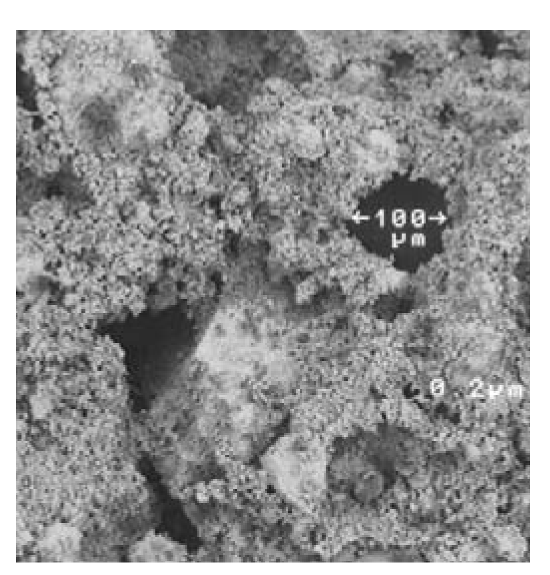
Se trata, en primer lugar, de reproducir un mortero lo más exactamente posible en su composición química y mineralógica, en su relación árido/ligante y en sus propiedades físicas (porosidad y distribución porosimétrica, granulometría del árido).

Para caracterizar un mortero antiguo separamos el árido y el ligante, mediante acetona seca como medio dispersante. Calculamos luego la relación árido/ligante. El análisis de la distribución granulométrica, morfología y composición mineralógica del árido nos da información de su origen. En el ligante se determina el contenido en cal y sus impurezas. El examen ulterior del sistema poroso del mortero nos permite prever su comportamiento ante el deterioro.

Los morteros medievales están poco estudiados. Frecuentemente de calidad mediocre, friables y poco homogéneos, carecen de la compactación distintiva de las construcciones romanas. Varían mucho en el tiempo y de un lugar a otro, incluso entre edificios contemporáneos y próximos en el espacio.



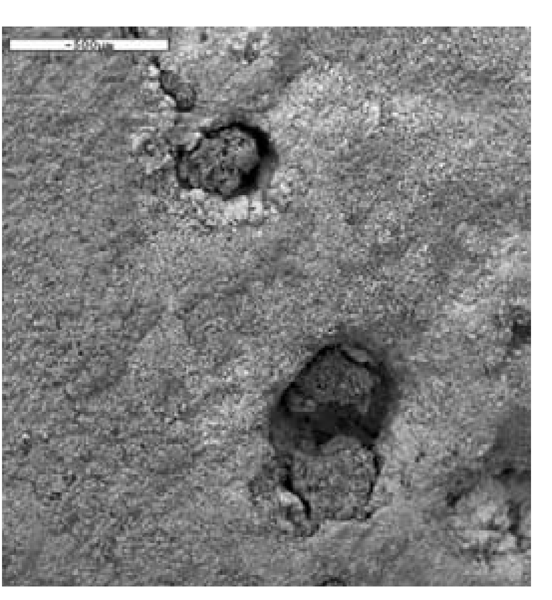
1. Microfotografía de un mortero de unión con clastos de sílice y caliza englobados en el ligante de calcita. Grietas de retracción por el fraguado



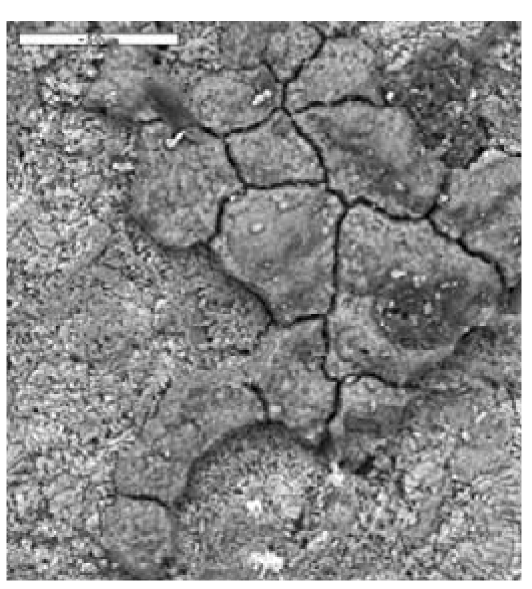
2. Microfotografía de un clasto de cuarzo seudoidiomorfo trabado por ligante de cal y con una porosidad intergranular de tipo móldico y radial



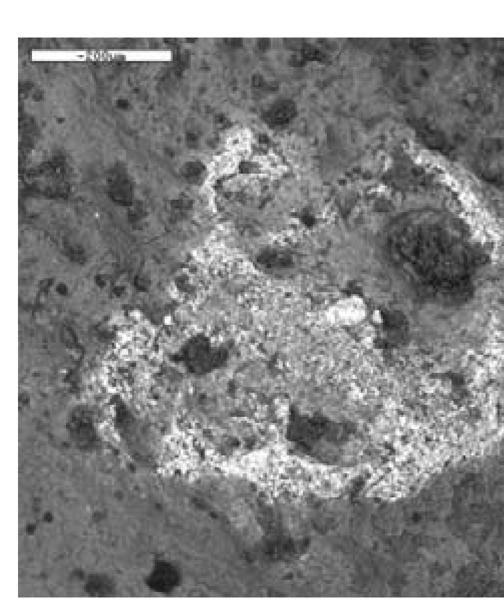
3. Microfotografía en la que se aprecia una porosidad radial cuyo origen posiblemente sea por retracción al fraguar el mortero de cal



4. Microfotografía de pequeñas cavidades en un mortero (revoco) rellenas de material carbonoso, cenizas



5. Microfotografía de una costra superior agrietada de material arcilloso y minerales de hierro sobre substrato de $CaCO_3$



6. Costra externa tapizada de restos carbonosos en cuya composición se detectan indicios de Pb, P y Ti

No acaba de dilucidarse la presencia de ciertas sustancias minoritarias (pelo de animales, claras de huevos, leche, caseína o sangre) en la composición del mortero, por el contrario, sí ha quedado demostrado el añadido de teja molida y de escayola. Se hereda de los morteros más antiguos (griegos y romanos) la inclusión de lavas. Por su naturaleza porosa, los fragmentos de material volcánico hacen a los morteros más permeables al aire y permiten así una mejor carbonatación de la cal. Igualmente se incorporan ciertas arcillas cocidas que, sin embargo, dan a menudo una reactividad muy débil o nula dependiendo de la naturaleza de la arcilla y de la temperatura de cocción.

A menudo los morteros de cascotes son asociados y amasados con gravas de tamaño grueso y cal mezclada con carbón de madera. Estos restos carbonosos se pueden interpretar como impurezas de los hornos de cal pero también como un componente más. Para las lechadas y las uniones, los albañiles utilizan arena fina y cal muy blanca. En el tránsito del período medieval al Renacimiento se emplea arena de llanura aluvial, lavada para quitar todo vestigio de arcilla y de tierra.

La cal grasa procede siempre de la cocción de caliza muy pura, compuesta casi exclusivamente de carbonato de calcio ($CaCO_3$). Bajo el efecto del calor, el carbonato de calcio se disocia, el dióxido de carbono se escapa y el resto es la cal viva u óxido de calcio (CaO).

Los fragmentos de cal viva en contacto con el agua se hidratan y se pulverizan obteniéndose entonces la cal apagada o cal hidratada ($Ca[OH]_2$). Esta cal viva mezclada con arena y agua da un mortero aéreo. El proceso se efectúa en dos tiempos. En una primera fase la compactación se produce por desecación, fenómeno análogo al endurecimiento de la arcilla. En un segundo momento hay carbonatación de la cal, que se combina con el gas carbónico del aire y vuelve a dar caliza ($CaCO_3$). Esta reacción confiere al mortero su resistencia final e impide su desmoronamiento si vuelve a ser humedecido posteriormente.

RICARDO CASTELLÓ MONTORI
Centro de Ciencias
Medioambientales, CSIC
Madrid

Cutícula vegetal

Filtro y barrera

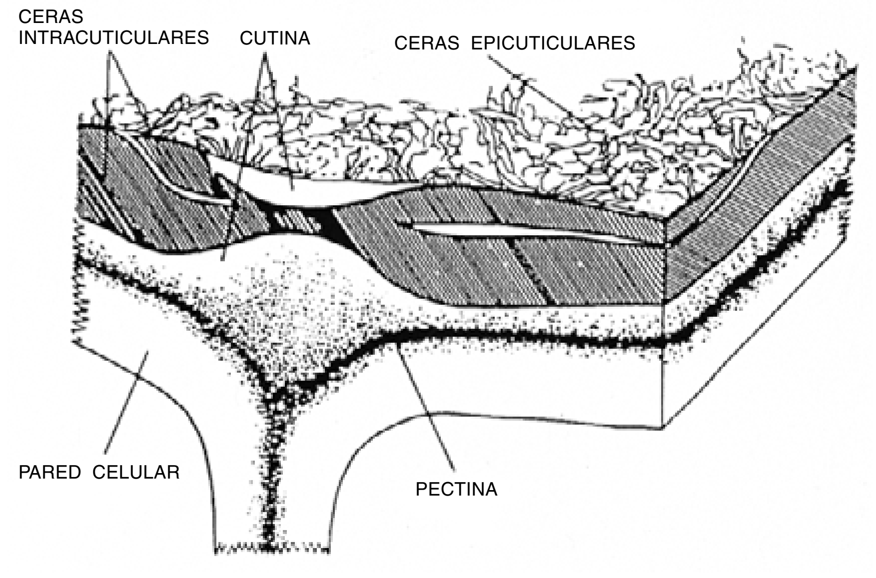
En el curso de la evolución química y biológica, los organismos vivos han desarrollado una serie de estructuras de naturaleza polimérica que los aíslan y protegen del medio externo. En los animales, dicha función corre a cargo de proteínas especializadas, mientras que en las plantas superiores la función de aislamiento y protección desde hace 400 millones de años corre a cargo de la cutícula vegetal o membrana cuticular.

La cutícula vegetal es una membrana extracelular de naturaleza lipídica que cubre las hojas y frutos de las plantas superiores. El componente básico de la cutícula es la cutina, un biopolímero amorfo, insoluble y con un elevado grado de entrecruzamiento formado por ácidos grasos hidroxilados de 16 y 18 átomos de carbono unidos entre sí por enlaces tipo éster. Asociadas a esta matriz se encuentran las ceras cuticulares depositadas sobre la superficie externa (ceras epicuticulares) o embebidas en la cutina (ceras intracuticulares). Estas ceras, de naturaleza cristalina, se hallan constituidas por alcanos o parafinas, alcoholes, ésteres y ácidos grasos de cadena larga.

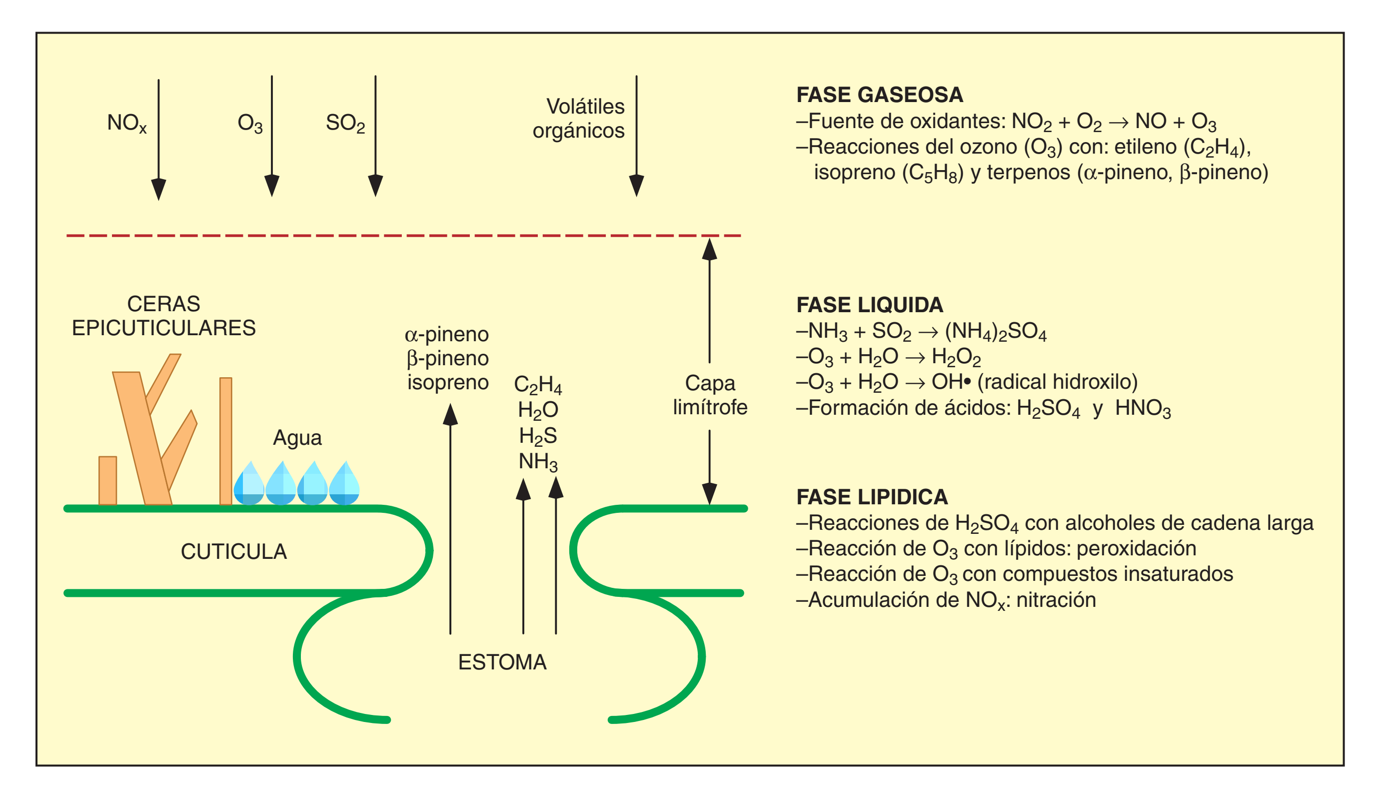
La cutícula cubre la pared celular más externa de las células epidérmicas de hojas y frutos. Dicha pared celular, rica en celulosa y pectina, puede sufrir una degradación química o enzimática, permitiendo así el aislamiento de la membrana. La cutícula vegetal forma una auténtica barrera química protectora, que actúa como interfase entre la célula vegetal y el exterior.

Las plantas acumulan contaminantes de diversa naturaleza y procedencia; a través de la raíz incorporan los depositados en el suelo y, a partir de la adsorción foliar, los volátiles en la atmósfera. Apreciaremos mejor el papel de la cutícula vegetal, si tenemos en cuenta que la superficie foliar de plantas herbáceas y leñosas es unas 20 veces mayor que el área de suelo sobre el cual se desarrollan, y que la cantidad total de material de origen cuticular (cutina, ceras) en bosques y otras comunidades agrícolas se estima entre 180 y 1500 kg por hectárea.

En la región inmediata de la cutícula en contacto con la atmósfera hay una transición brusca desde un régimen turbulento, la atmósfera, hacia un régimen de difusión molecular de naturaleza laminar. En esa zona se establece una resistencia a la deposición y circulación de compuestos químicos, en su mayoría gases. Estos compuestos pueden dividirse en antropogénicos (SO_2, NO_x, CO_2, derivados fluorados y O_3, principalmente), biogénicos (CO_2, agua, etileno o isopreno) o compuestos originados de la reducción biológica de contaminantes (H_2S a partir de SO_2 y NH_3 a partir de NO_x).



1. Corte transversal de cutícula vegetal. Se ilustran los principales componentes de la misma. La membrana cuticular está situada sobre la pared celular de las células epidérmicas, ricas en celulosa y pectina



2. Los contaminantes atmosféricos NO_x, O_3, SO_2 y otros compuestos orgánicos de bajo peso molecular inciden directamente sobre la superficie cuticular. Aquí, la presencia de agua desencadena diversas reacciones químicas. Los estomas de las hojas facilitan el intercambio y emisión de gases y volátiles orgánicos biogénicos (compuestos terpenoides), que pueden también reaccionar con especies oxidantes en la fase gaseosa. En la región de la cutícula en contacto inmediato con la atmósfera coexisten tres fases de interacción: gaseosa, líquida y lipídica

Los contaminantes atmosféricos y otros gases quedan provisionalmente confinados en una zona donde coexisten tres fases. Una primera fase, líquida, corresponde al agua depositada que humedece la superficie cuticular externa de la hoja o fruto y al agua unida a grupos funcionales polares de la cutina o formando agregados moleculares en la ultraestructura cuticular. Una segunda fase, de naturaleza lipídica, está determinada por las ceras cuticulares y la cutina. La tercera, fase gaseosa, ocurre en la zona inmediata entre la superficie cuticular y la atmósfera.

La fase líquida viene a ser el “fregadero” donde se limpian los contaminantes solubles en agua, aunque puede darse aquí también la formación de nuevos compuestos químicos. Se sabe, en particular, de la formación de sales de amonio a partir de NH_3 y SO_2, la producción de ácidos minerales fuertes y la aparición de especies oxidantes muy reactivas tales como el peróxido de hidrógeno y radicales hidroxilo.

La fase lipídica constituye el sumidero de microcontaminantes de naturaleza orgánica, acumulados en las ceras epicuticulares. Se han descrito reacciones del ácido sulfúrico formado en la fase líquida con los grupos hidroxilo de los alcoholes primarios y secundarios de cadena larga presentes en las ceras epiestomáticas de coníferas. Revisten interés las reacciones de ozono, O_3, con parafinas de algunas ceras epicuticulares. La reacción de óxidos de nitrógeno con ceras produce en éstas una pérdida notable de su cristalinidad, lo que favorece la desecación foliar.

En la fase tercera se ha observado la formación de oxidantes fuertes a partir principalmente de la producción de ozono por reacción de los óxidos de nitrógeno con oxígeno molecular atmosférico.

En resumen, la superficie foliar se halla expuesta a una intensa agresión por contaminantes atmosféricos antropogénicos. Una vez degradada la barrera lipídica que constituye la cutícula vegetal, el escenario para una ulterior modificación del metabolismo intracelular está preparado.

Eva Domínguez Carmona
y Antonio Heredia
Facultad de Ciencias
Universidad de Málaga

Cabaña española

Encefalopatías espongiformes animales

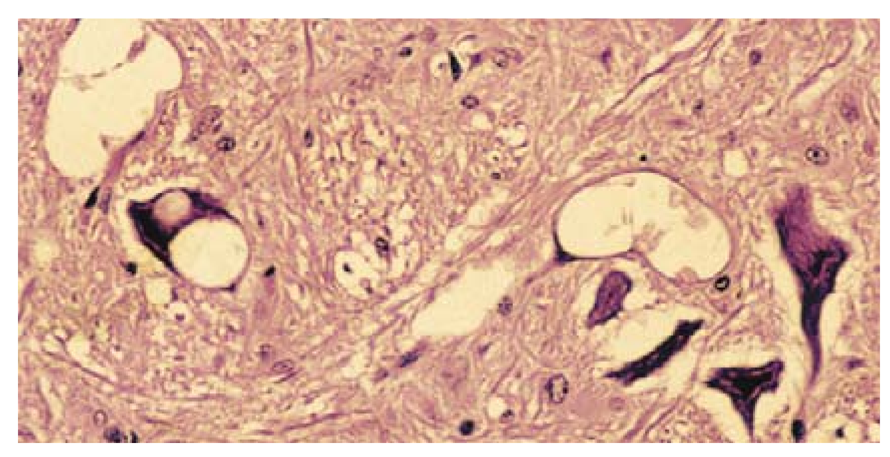
En 1985 aparecía en Gran Bretaña la encefalopatía espongiforme bovina (EEB) o “enfermedad de las vacas locas” como consecuencia de la adaptación del agente infeccioso del prurigo lumbar o “Scrapie” ovino al ganado bovino.

Este salto entre especies hizo temer una posible transmisión al hombre por consumo de productos cárnicos vacunos. Aunque el riesgo hipotético de un segundo salto interespecífico se consideraba muy bajo, diez años más tarde se detectaron los primeros indicios de la transmisión de la EEB al hombre. Los estudios bioquímicos han confirmado la similitud de los agentes causantes de la EEB y de la nueva enfermedad en el hombre conocida como nueva variante del Creutzfeldt-Jakob.

Las encefalopatías espongiformes transmisibles (EET), o enfermedades producidas por priones, forman un extraño conjunto de patologías humanas y animales, asociadas a agentes infec-



1. Dos ovejas con prurigo lumbar en la fase intermedia de la enfermedad. Presentan ataxia y depresión (izquierda) *y prurito con pérdida de lana* (derecha)



2. Vacuolización neuronal y del neuropilo en el sistema nervioso central de una oveja enferma (400 aumentos)

ciosos atípicos constituidos por una proteína anormal denominada PrP-sc. Esta proteína procede de la modificación patológica de una proteína PrP normal. Cuando esta proteína cambia su configuración estructural a la forma de PrP-sc se torna patógena.

En España, la única EET diagnosticada en los animales es la ovina y caprina. No se ha diagnosticado ningún caso de EEB. Tampoco se ha observado la encefalopatía espongiforme felina (EEF) ni la encefalopatía espongiforme de animales de zoológico, procesos asociados a la EEB.

En España diagnosticamos la encefalopatía espongiforme en 1984. Se trata de un proceso poco frecuente en nuestro país, ya que, según las estimaciones más pesimistas, su prevalencia no alcanzaría el 0'5 por 1000 de los rebaños ovinos. La incidencia de los animales enfermos en los rebaños que nosotros hemos estudiado varió entre el 2 y el 9 %, alcanzando extraordinariamente en uno de los ganados el 18 % de bajas anuales.

La encefalopatía espongiforme es una enfermedad degenerativa del sistema nervioso central que se presenta exclusivamente en adultos, siendo más frecuente entre los 2 y 4 años de edad. Se caracteriza por un período de incubación largo, seguido de un curso clínico lento (3 a 6 meses), progresivo y fatal; no hay terapia ni posibilidades de vacunación preventiva.



3. Imagen de microscopía electrónica de las fibrillas asociadas a la enfermedad en el encéfalo de una oveja (30.000 aumentos)

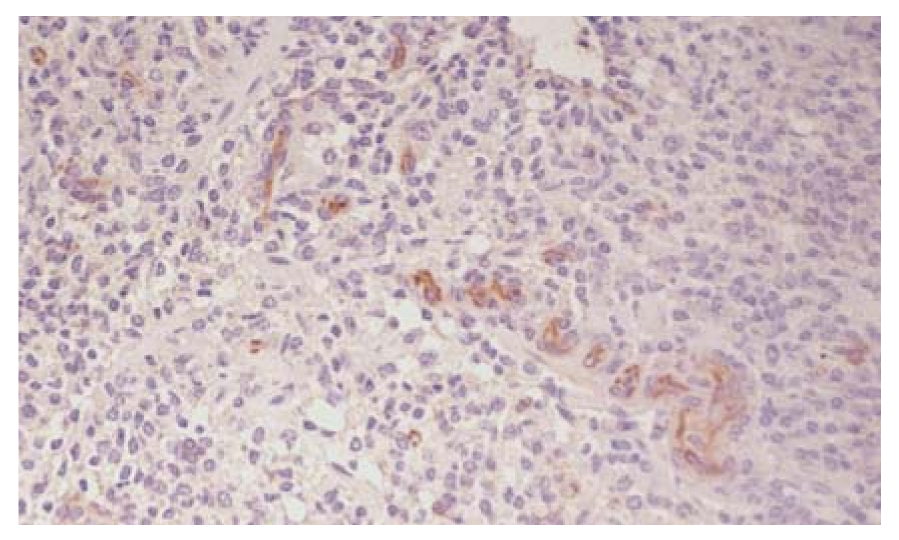
El cuadro clínico que hemos observado se caracteriza por la alteración del comportamiento, ya que los animales afectados dejan de seguir al conjunto del rebaño y muestran fases de depresión y excitación; por un intenso prurito, que se manifiesta por constantes lamidos, mordiscos y rascados contra paredes y objetos fijos del establo, lo que ocasiona pérdida de lana y heridas cutáneas; por la incoordinación progresiva de movimientos, que se inicia en el tercio posterior y más tarde afecta también al anterior, hasta causar la postración del animal; por el rechinar de dientes frecuente y temblores musculares mioclónicos en cabeza y cuello; y por un deterioro físico progresivo, adelgazamiento, caquexia y muerte.

Las lesiones más representativas consisten en la vacuolización de neuronas y del neuropilo localizadas en núcleos nerviosos específicos del bulbo, puente y cerebelo. Aunque también se aprecia pérdida nerviosa y astrocitosis, estas lesiones son de difícil aplicación en el diagnóstico rutinario.

Trabajamos en la búsqueda de proteínas marcadoras que puedan servir para un diagnóstico precoz. Se dio un primer paso con el método de detección de la proteína 14-3-3 en el líquido cefalorraquídeo. Este método podía identificar a los animales infectados, cuando empezaban a desarrollar la enfermedad, pero posee el inconveniente de ser difícil de aplicar en las condiciones de "campo" y tampoco ha resultado demasiado específico, ni precoz.

Dos procedimientos recientes abren nuevas esperanzas y se basan en la detección de la proteína prion (PrP-sc) en tejido linfoide. El primero parte de la biopsia de la amígdala; el segundo, de la biopsia de la membrana nictitante o tercer párpado de los animales sospechosos. Ambos procedimientos, específicos y precoces, tienen el inconveniente de ser de difícil aplicación masiva en las condiciones de campo.

La encefalopatía espongiforme se transmite sobre todo por vía vertical, de la oveja infectada a su cordero, aunque no sea infrecuente la vía horizontal, de la oveja enferma a otra sana. Nos hallamos, pues, ante, una enfermedad infecciosa, si bien



4. Células positivas a la proteína PrP en tejido linfático de una oveja. Técnica inmunocitoquímica (400 aumentos)

muy condicionada por la genética, es decir, por la configuración del gen que determina la proteína PrP normal del animal receptor.

El primer caso español de encefalopatía espongiforme ovina lo diagnosticamos en un rebaño de ovejas del nornordeste del país. Afectaba también a otros rebaños del entorno, pero su escasa incidencia fue la razón de que no existiera un diagnóstico anterior. Se trata de rebaños bastante aislados, salvo en los meses de verano, cuando comparten "pastos de puerto" con ovejas francesas y los pastores acostumbran intercambiar animales. Siendo el "scrapie" ovino una enfermedad más frecuente en Francia, parece razonable situar allí el origen de estos casos.

Pero el episodio más preocupante se presentó en 1986, cuando se detectó la enfermedad en un rebaño selecto. Este ganado y otros de su entorno habían incorporado, unos años antes, animales importados de Inglaterra de la raza Suffolk. Por durar varios años el período de incubación de la enfermedad, dio tiempo a que los ganaderos estuvieran vendiendo animales a otros rebaños antes de la aparición del proceso, lo que provocó la diseminación de la patología a más de 40 explotaciones ovinas.

Cuando estudiamos el genotipo de las ovejas afectadas comprobamos que el gen de la proteína PrP poseía en el codón 171 la configuración guanidina/guanidina, lo que proporciona la máxima sensibilidad a la enfermedad en las ovejas de raza Suffolk. Ahí se escondía la herencia no deseada de las ovejas británicas con las que se pretendía mejorar la producción cárnica de nuestras ovejas. En los últimos años hemos diagnosticado algunos casos más en el centro de España, asociados a rebaños con antecedentes de cruces con ovejas de leche importadas.

A diferencia de la EEB, el "scrapie" ovino no está relacionada con las encefalopatías espongiformes humanas. Además, en España no se han dado las condiciones británicas que favorecieron el salto entre especies: alta incidencia de la patología en los rebaños ovinos ingleses, alto porcentaje de material ovino en la composición de las harinas de carne y hueso, cambios en los procesos industriales de fabricación de estas harinas (permitiendo la supervivencia de los priones ovinos) y masiva utilización de estas harinas en la alimentación del ganado bovino.

JOSÉ A. GARCÍA DE JALÓN C.
Departamento de Patología Animal
Facultad de Veterinaria, Zaragoza

La alcachofa

Composición química

La alcachofa es un cultivo tradicional en Navarra. Desde muy antiguo los agricultores de la Ribera seleccionan una planta de alcachofa de características propias. La calidad de los cogotes de alcachofa, así como la gran demanda de plantones, llevó, en 1987, a la creación de la denominación de calidad "Alcachofa de Tudela".

Dado el interés existente en este producto y la experiencia adquirida en

estudios similares con otros productos hortícolas de interés para Navarra —pimiento del piquillo y cardo de Peralta— nos hemos planteado conocer la composición multielemental y su evolución en la planta entera de alcachofa de Tudela, cultivada en dos parcelas de la ribera navarra y muestreada en siete etapas significativas de su ciclo agrícola: zuecas, planta tomada, planta en primera brotación, planta en estadio de roseta, planta en segunda brotación, planta en plena producción y zuecas obtenidas de la planta. También nos interesaron las inflorescencias —cogotes— de la alcachofa en tres momentos distintos de su recolección. Sin olvidar la comparación con las inflorescencias de otras tres variedades de alcachofa (INIA-D, *in vitro* y Crisantem).



Planta de alcachofa de Tudela cultivada en la Ribera de Navarra

Nuestro estudio incluye 12 muestreos secuenciales del suelo de huerta donde se cultiva la alcachofa. En total hemos recogido 46 muestras de campo, 22 vegetales y 24 de suelo, que han sido sometidas a diversos análisis químicos, desde el método Kjeldahl hasta la espectroscopía de emisión por plasma de acoplamiento inductivo, pasando por la colorimetría, fotometría de llama, espectroscopía de absorción atómica, fluorescencia de rayos X y análisis instrumental por activación con neutrones. Con ello hemos obtenido 1000 datos de concentración de 34 elementos en planta y 1613 datos de concentración de 50 elementos en suelo. Sometimos luego esas concentraciones elementales a ulteriores procedimientos de análisis de datos más depurados.

De todo ello resulta que la planta y el suelo son dos sistemas, aunque interrelacionados, funcionalmente diferentes. El primero dinámico en sí y repetido en ambas parcelas, a pesar de que el suelo es bastante estático. En estas condiciones, la planta regula, rige y controla su propia composición elemental en todos sus estadios con independencia del suelo sobre el que crece, es decir, la planta es indiferente a la localidad de cultivo y su composición elemental guarda estrecha relación con la fase de su ciclo agrícola.

Aplicando el método de acumulación jerárquica ("clusters jerárquicos") a los datos de concentraciones elementales en planta, hemos visto que los dendrogramas resultantes ordenan la variabilidad observada a lo largo del ciclo de la planta en tres grupos de estadios: estadios reposo-diseminadores o próximos —zuecas tanto de partida como de llegada y planta tomada; estadios de madurez vegetativa —planta en primera brotación, planta en estadio de roseta, planta en segunda brotación y planta en plena producción; y estadios reproductores —todas las alcachofas tanto las de Tudela como las variedades.

Si profundizamos en esta variabilidad de concentraciones a lo largo de los estadios, comparando nuestra fase multiplicadora-diseminadora —zuecas— con otras fases multiplicadoras-diseminadoras conocidas (semillas de pimiento del piquillo y de cardo de Peralta), se observan coincidencias y divergencias en las concentraciones de algunos elementos: las mínimas de boro, cloro, potasio y calcio parecen responder a la situación común de reposo, mientras que las concentraciones mínimas de escandio y máxima de fósforo de las semillas se pueden achacar a la fase embrionaria del esporofito en las semillas, y las mínimas de fósforo y wolframio y máximas de cobre de las zuecas hay que achacarlas a la fase adulta del esporofito en las zuecas. El hombre aprovecha uno u otro órgano multiplicador-diseminador en agricultura, dependiendo de la especie.

Respecto a la fase reproductora de la alcachofa, las inflorescencias, tanto de la variedad de Tudela muestreadas en tres momentos de la producción, como las de las otras tres variedades, son, a nivel de concentraciones elementales, similares entre sí.

La alcachofa es un cultivo de otoño, invierno y primavera, adaptado a las temperaturas de climas mediterráneos, donde los inviernos son suaves y las primaveras frescas. Sin embargo, durante nuestra experiencia la planta en primera brotación se vio afectada por las primeras heladas otoñales; pues bien, el estrés causado por esas heladas se reflejó en la composición elemental de la planta en ese estadio, al alcanzarse la máxima acumulación de B, N, Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Mn, Zn, Br y Sr, de todo el ciclo agrícola. Podemos concluir que las heladas primo-autumnales afectan a la composición elemental de la alcachofa al encontrar a la planta en un estadio no preparado para soportar esas bajas temperaturas.

Este estudio pone de manifiesto la estrecha relación entre forma, función y composición elemental para las tres fases de la vida de la planta de alcachofa: vegetativa, reproductora y reposo-diseminadora, estrecha relación posible porque la planta controla las concentraciones de sus elementos en cada una de las fases de su desarrollo con independencia, en condiciones óptimas, del medio en que vive.

RITA YOLANDA CAVERO REMÓN,
M.ª LUISA LÓPEZ FERNÁNDEZ
y RICARDO MARCO GARCÍA.
Departamento de Botánica,
Facultad de Ciencias,
Universidad de Navarra

De cerca

Texto y fotos: Josep-Maria Gili y Sergio Rossi

Cohabitación

1. Colonias del briozoo Smittina *que crecen formando estructuras arboriformes sustentadas por un pequeño pie que ocupa un espacio muy reducido sobre el sustrato*



2. Comunidad bentónica dominada por esponjas. El ósculo de una especie del género Anchinoe *lucha por permanecer abierto ante la presión de otras esponjas del género* Crambe

No es cómoda la vida en el bentos o sustrato rocoso del fondo del mar. Menudean allí las situaciones de estrés que provoca la competencia por el espacio. Hay que llegar, asentarse, crecer y reproducirse, en un ambiente muy hostil, donde los vecinos hacen uso de una suerte de derecho de conquista o primer ocupante.

La estrategia ecológica seguida para vencer los obstáculos varía con el organismo. Algunos cnidarios, esponjas y tunicados esgrimen un poderoso arsenal químico para ganar más espacio o mantenerlo ante el acoso de otros inquilinos. Ciertas algas desarrollan estructuras calcáreas resistentes, una especie de empuje mecánico capaz de desplazar a los antagonistas.

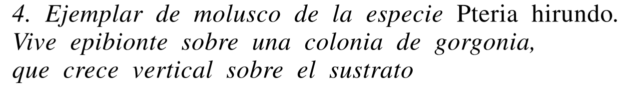
Si el organismo quiere evadirse de la tensión reinante en el substrato bidimensional, buscará la solución en la tridimensionalidad. Dicho de otro modo, crecerá hacia arriba, como un "árbol". Así lo hacen de forma rápida las algas carnosas e hidrozoos y con mayor parsimonia, gorgonias, corales y briozoos.

Algunas esponjas ocupan poco substrato huyendo de la competencia directa y crecen "colgando", de forma tridimensional. Ciertos gusanos marinos perviven en un espacio restringido mientras no comen, aumentándolo a través de estructuras filtradoras que multiplican la superficie de captura sólo en el caso de necesitar alimento; gracias a dicha estrategia, sólo han de defender un ámbito restringido de espacio de forma permanente.

Los más oportunistas consiguen superar las barreras químicas que impiden el asentamiento de unos organismos sobre otros encaramándose a los tridimensionales y aprovechando una estructura de optimización de captura de alimento ya formada por sus anfitriones.



3. Penacho bucal de un poliqueto del género Serpula *que emerge de vez en cuando de su tubo calcáreo. El tubo está generalmente recubierto por otros organismos*



4. Ejemplar de molusco de la especie Pteria hirundo. *Vive epibionte sobre una colonia de gorgonia, que crece vertical sobre el sustrato*





5. Ejemplar de una esponja del género Oscarella *instalado en el techo de una cavidad submarina. Crece hacia abajo, sin necesidad de ocupar nuevo sustrato*

Ratones expertos

Joe Z. Tsien

Mediante ingeniería genética se ha conseguido reunir ciertos componentes moleculares del aprendizaje y la memoria y obtenido un ratón bastante experto

Cuando decidí dedicarme a la investigación científica no me imaginaba que algún día mi trabajo sería objeto de un programa de entretenimiento en televisión. Pero a finales de septiembre, después de anunciar que en mi laboratorio habíamos conseguido, por manipulación génica, mejorar la capacidad de aprendizaje y memoria de una cepa de ratones, vi con sorpresa el jugo que le sacaba un programa disparatado de humor.

Nuestra investigación se incardinaba, sin embargo, en una dilatada trayectoria de trabajos consagrados a descubrir qué pasa en el cerebro durante el aprendizaje y de qué están hechos los recuerdos que guarda la memoria. Al generar estos ratones listos —una cepa a la que dimos el nombre de *Doogie*— confirmábamos una vieja teoría de más de 50 años sobre los mecanismos de aprendizaje y memoria e ilustrábamos el papel de una molécula particular en el proceso de la formación de la memoria. Esa molécula podría algún día constituirse en blanco de fármacos para tratar la enfermedad de Alzheimer, entre otros trastornos cerebrales, y quizá para impulsar la capacidad de aprendizaje y de memoria de las personas sanas.

Importa entender las bases moleculares del aprendizaje y de la memoria porque lo que aprendemos y lo que recordamos determinan, en buena medida, lo que somos. La memoria, y no sólo la cara y otros rasgos físicos, ayudan a definir a un individuo. Lo saben muy bien quienes conocen de cerca a los pacientes de Alzheimer. Además, el aprendizaje y la memoria trascienden al individuo para transmitir nuestra cultura y civilización de generación en generación. Son fuerzas decisivas de la evolución cultural y social, así como del comportamiento.

Nociones básicas

El cerebro humano contiene unos cien mil millones de neuronas, trabadas en redes sobre las que se asientan diversidad de atributos mentales y cognitivos, desde la memoria hasta la personalidad, pasando por la inteligencia y las emociones. Las bases para entender los mecanismos moleculares y genéticos del aprendizaje y la memoria se pusieron en 1949. Donald O. Hebb propuso entonces una idea profunda, aunque sencilla, para describir la representación y almacenamiento cerebral de la memoria. En lo que ahora se conoce por regla del aprendizaje de Hebb, éste propuso que un recuerdo se produce cuando dos neuronas conectadas se activan simultáneamente de suerte tal, que se refuerza la sinapsis, lugar donde las dos células nerviosas entran en contacto. En la sinapsis, la información vehiculada por los neurotransmisores, sustancias químicas, fluye desde la célula presináptica hacia la postsináptica.

En 1973 Timothy V. P. Bliss y Terje Lømo descubrieron un modelo experimental con el sello característico de la teoría de Hebb. Observaron que las neuronas del hipocampo (región del cerebro con forma de caballito de mar) se acoplaban con mayor firmeza si las estimulaban con una serie de pulsos eléctricos de alta frecuencia. El aumento de esta intensidad sináptica —fenómeno denominado potenciación a largo plazo (PLP)— puede durar horas, días o incluso semanas. El hecho de que la PLP se encuentre en el hipocampo resulta fascinante, pues esta estructura cerebral desempeña un papel decisivo en la formación de la memoria del hombre y los animales.

Estudios posteriores de Mark F. Bear y otros demostraron que la aplicación de una estimulación de baja frecuencia a la misma vía del hipocampo producía un *descenso* de larga duración de la intensidad de las conexiones en ese lugar. La reducción, también duradera, recibe el nombre de depresión a largo plazo (DLP); no hemos de confundirla con la depresión clínica.

La intensificación y la relajación de las conexiones sinápticas a través de procesos de PLP y de DLP se han convertido en los principales candidatos para explicar el mecanismo cerebral de almacenamiento y desaparición de la información aprendida. Sabemos que la PLP y la DLP adquieren formas plurales. Los fenómenos ocurren también en diversas regiones del cerebro, además del hipocampo, incluidos el neocórtex —la sustancia gris— y la amígdala, una estructura implicada en las emociones.

¿Qué mecanismos moleculares controlan estas formas de cambios sinápticos, o plasticidad? Estudios de los años ochenta y noventa acometidos por Graham L. Collingridge, Roger A. Nicoll, Robert C. Malenka, Gary S. Lynch y otros hallaron que los cambios dependían de un mismo tipo de molécula. Estos investigadores demostraron que la inducción de las formas principales de PLP y DLP requería la activación de los receptores de NMDA, instalados en las membranas celulares de las neuronas postsinápticas.

Los receptores de NMDA son poros minúsculos, constituidos por cuatro subunidades proteicas que controlan la entrada de iones calcio en las neuronas. (El nombre de estos receptores deriva del N-metil-D-aspartato, un compuesto químico artificial que se une a ellos.) Son los candidatos perfectos para operar los cambios sinápticos de la regla de aprendizaje de Hebb, pues requieren que se abran dos señales distintas, a saber, la unión del glutamato neurotransmisor y la despolarización de membrana, un cambio eléctrico. Nos hallamos así ante los interruptores moleculares ideales para funcionar como "detectores de coincidencia" y ayudar a que el cerebro asocie dos sucesos.



CONCEPTOS BASICOS

UN RATON LLAMADO *DOOGIE*

Sobre la destreza de los ratones "expertos"

¿En qué difieren los ratones *Doogie* de otros ratones? Se les ha sometido a manipulación génica para que produzcan por encima del nivel normal una subunidad clave del receptor del N-metil-D-aspartato (NMDA), una proteína.

¿Qué misión cumple el receptor de NMDA? Contribuye a reforzar la conexión entre dos neuronas que están activas al mismo tiempo. Se supone que en esa intensificación reside el fundamento del aprendizaje y la memoria.

¿Hasta dónde llega la pericia de los ratones *Doogie*? Nada que tenga que ver con la inteligencia matemática u otros tipos de creatividad humana. Pero los *Doogie* distinguen entre objetos que han visto antes y recuerdan cómo encontrar una plataforma en un tanque de agua turbia mucho mejor que los ratones normales.

¿De qué modo la manipulación génica logra que sean más listos? El receptor de NMDA de los ratones *Doogie* permanece abierto el doble de tiempo que en los ratones normales. Ese tiempo extra les posibilita una formación más eficiente del recuerdo.

¿Podría usarse la misma técnica para potenciar la capacidad humana de aprender y recordar? En principio, la posibilidad existe. Pero el aprendizaje y la memoria en el hombre son mucho más complejos que el reconocimiento de objetos o el recuerdo de un laberinto acuático. Además de las barreras científicas y técnicas, deberían abordarse la seguridad y los problemas éticos que rodean la ingeniería genética en humanos. Parece más probable que los laboratorios farmacéuticos intentarán antes desarrollar fármacos que interaccionen con el receptor de NMDA para potenciar la capacidad de memoria en personas con déficit de ésta.

Aunque la PLP y la DLP dependen de receptores de NMDA, la asociación de procesos de tipo PLP y DLP con el aprendizaje y la memoria ha resultado más difícil de lo esperado. El equipo encabezado por G. M. Morris ha observado el fenómeno siguiente: a las ratas cuyos cerebros eran tratados con fármacos que bloquean el receptor de NMDA les costaba aprender a resolver la prueba del laberinto acuático de Morris mucho más que a otras ratas. Este hallazgo es, en buena medida, congruente con la predicción relativa a la misión que cumple la PLP en el aprendizaje y la memoria. Mas, con frecuencia, los fármacos producen alteraciones de comportamiento, sensoriales y motores; existe, por tanto, una línea muy sutil entre la eficacia del fármaco y su toxicidad.

Hace cuatro años, cuando yo trabajaba en el laboratorio de Susumu Tonegawa en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, desarrollé una nueva técnica genética para estudiar el papel del receptor de NMDA en el aprendizaje y la memoria. La técnica refinaba el método para crear los ratones "knock-out", individuos en los que se ha inactivado de intento un gen. Los ratones knock-out tradicionales carecen de un gen particular en cada célula y tejido. Del estudio de la salud y comportamiento de esos animales se deduce qué función desempeña el gen de marras.

Muchos tipos de ratones knock-out mueren al nacer o antes del parto, privados de los genes necesarios para el desarrollo normal. Los genes que cifran las subunidades de los receptores de NMDA resultaban esenciales en un grado parecido; los ratones knock-out cuyo receptor de NMDA se hallaba afectado morían en los primeros momentos de la vida. Y así fue como vislumbré un camino para borrar una subunidad del receptor de NMDA en sólo una región específica del cerebro.

El estudio de un ratón knock-out

Con la nueva técnica preparé un ratón que carecía, en la región CA1 del hipocampo, de una parte crítica del receptor de NMDA, la subunidad NR1. Nos acompañó la fortuna en eliminar el gen en la región CA1 porque era ahí donde se había centrado la mayoría de los estudios sobre PLP y DLP y porque las personas con lesiones en esa área presentaban déficits de memoria. En colaboración con Matthew A. Wilson, Patricio T. Huerta, Thomas J. McHugh y Kenneth I. Blum, del MIT, observé que los ratones knock-out habían perdido la capacidad de modificar la intensidad de las conexiones nerviosas en las regiones CA1. Estos animales tenían una representación espacial anormal y una memoria espacial pobre: no podían recordar el camino andado en un laberinto de agua. Investigaciones ulteriores en mi laboratorio de la Universidad de Princeton han revelado que los ratones se resentían también en otras tareas relacionadas con memorias no espaciales.

Aunque estos experimentos apoyaban la hipótesis de que los receptores de NMDA eran esenciales para la memoria, no resultaban definitivos del todo. Los fármacos utilizados para bloquear los receptores podrían haber ejercido su efecto a través de otras moléculas, además de los receptores de NMDA. Y los déficits de memoria de los ratones knock-out podrían deberse a otra anomalía inesperada e independiente de los déficits en PLP/DLP.

Para resolver estas cuestiones, decidí hace un par de años intensificar la función de los receptores de NMDA en ratones y comprobar si dicha alteración mejoraba el aprendizaje y la memoria. En caso afirmativo, el resultado —combinado con los obtenidos previamente— nos diría que el receptor de NMDA constituía un agente principal de los procesos de la memoria.

Me centré en las subunidades NR2A y NR2B del receptor de NMDA. Sabemos hoy que los receptores de NMDA de aves, roedores y primates permanecen abiertos más tiempo en los individuos jóvenes que en los adultos. La diferencia podría, quizás, explicar por qué los animales jóvenes aprenden más fácilmente —y

EL *DOOGIE* A PRUEBA
El ratón experto vuelve sobre sus pasos





En las pruebas iniciales de los ratones *Doogie*, observamos la mayor probabilidad de que reconocieran antes un objeto familiar que otro inédito, como el juguete rojo de la fotografía superior. Pero esa tarea de reconocimiento de objetos, así se llama la prueba, valora sólo un tipo de memoria.

Para averiguar si los *Doogie* gozaban de unas capacidades de aprendizaje y memoria reforzadas, recurrimos al test del laberinto acuático de Morris. En esta prueba de laboratorio más compleja, introdujimos un ratón en una pileta circular de 1,2 metros de diámetro y llena de agua turbia. Colocamos en la piscina una plataforma de plexiglás claro, punto menos que invisible, que era casi —no totalmente— de la misma altura que el agua, de manera que quedara oculta debajo de la superficie. Rodeamos la piscina con una cortina negra de ducha que tenía ciertas marcas, como el punto rojo que aparece en la fotografía. A los ratones no les gusta mojarse; en las pruebas nadan hasta encontrar la plataforma, donde se colocan casi fuera de la superficie del agua y descansan.

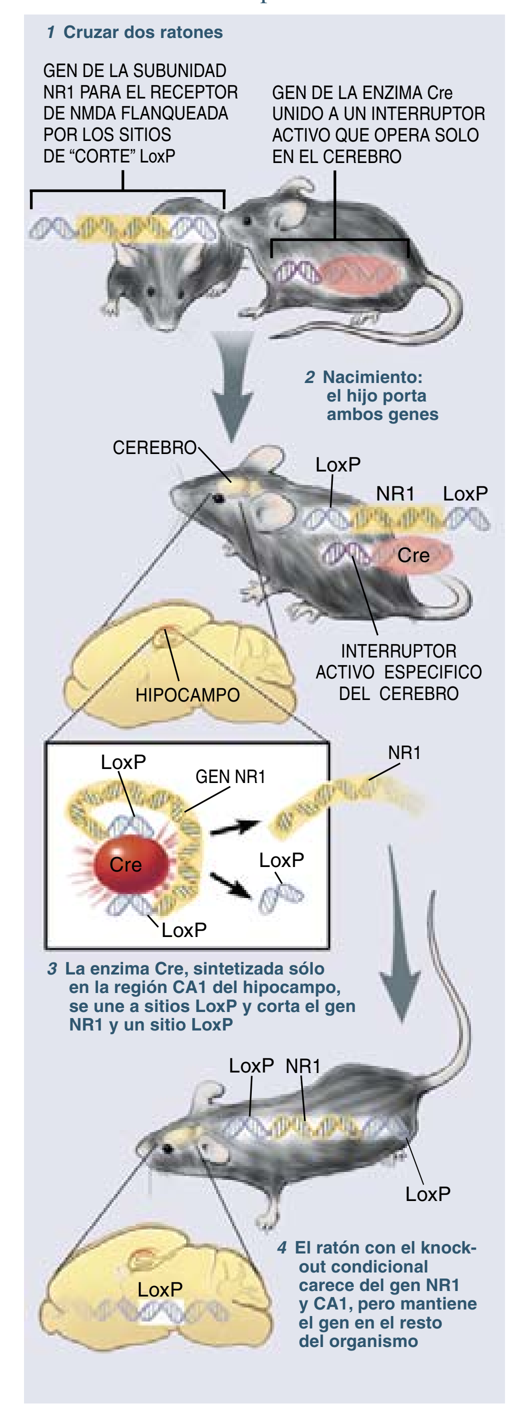
Observamos que los *Doogie* localizaban la plataforma sumergida antes que los ratones normales. Introdujimos una nueva complicación: quitamos la plataforma para ver si los animales recordaban dónde se había hallado ésta antes en relación con las marcas en la cortina como el punto rojo. Cuando les pusimos de nuevo en la piscina, los *Doogie* pasaban más tiempo que los ratones normales en el rincón donde había estado la plataforma, signo de que recordaban dónde debería encontrarse. ¿Alguna recompensa? Pues sí. Un buen secado con toalla y un poco de comida bajo la lámpara de rayos infrarrojos. —*J. Z. T.*





ASI SE CREA UN RATON TONTO

Se extirpa del cerebro un segmento de un receptor clave



1. PARA PRODUCIR ratones tontos y listos hay que manipular el receptor de NMDA, una proteína involucrada en el aprendizaje y la memoria. Sabido que el receptor de NMDA desempeña papeles clave en distintas partes del organismo, el equipo del autor empleó fragmentos de ADN para manipular los genes de diversas subunidades del receptor *sólo* en el cerebro. Los ratones listos, o *Doogie*, presentan subunidades extra en su cerebro; el cerebro de los ratones tontos, o knock-out condicionales, carece de una subunidad del receptor de NMDA.

ASI SE CREA UN RATON LISTO

Agregar en el cerebro una copia extra de parte de receptor clave

1 Aislar un óvulo fecundado

NUCLEO DEL OVULO

NUCLEO DEL ESPERMATOZOIDE

2 Microinyectar el gen que cifra la subunidad NR2B del receptor NMDA en uno u otro núcleo

GEN DE LA SUBUNIDAD NR2B DEL RECEPTOR DE NMDA

INTERRUPTOR ACTIVO ESPECIFICO DEL CEREBRO

3 Dejar que el óvulo fecundado se divida

4 Introducir varios embriones producidos de esta manera en una hembra

5 Nacimiento: sólo algunos miembros de la camada portan el gen que se ha introducido

GEN NR2B

6 Ratón *Doogie*

GEN NR2B (ACTIVO SOLO EN EL CEREBRO)

recuerdan durante más tiempo lo que han aprendido— que otros individuos más viejos.

A medida que los individuos maduran, comienza un cambio que consiste en sintetizar receptores de NMDA con subunidades NR2A en vez de NR2B. Los estudios de laboratorio han demostrado que los receptores con subunidades NR2B permanecen abiertos más tiempo que los que tienen NR2A. Pensé que ese cambio vinculado a la edad podría justificar la mayor dificultad de los adultos en aprender información nueva.

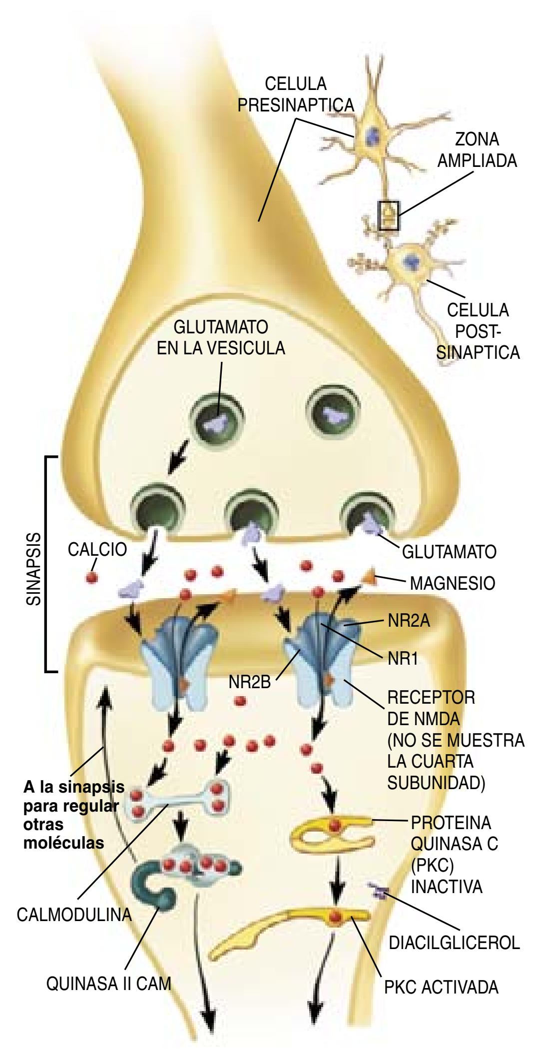
Tomé entonces una copia del gen que dirige la producción de NR2B y lo uní a un segmento especial de ADN que servía de interruptor para aumentar específicamente la capacidad sintetizadora de la proteína en el cerebro adulto. Inyecté el gen en óvulos de ratón fecundados; se incorporó en los cromosomas y produjimos ratones genéticamente modificados que portaban una copia extra del gen NR2B.

En colaboración con Guosong Liu y Min Shuo, mi grupo encontró que los receptores de NMDA de los ratones genéticamente modificados permanecían abiertos durante unos 230 milisegundos, casi el doble del tiempo característico en ratones normales. Determinamos también que las neuronas del hipocampo de ratones adultos establecían conexiones sinápticas más intensas que los ratones normales de la misma edad. Y, además, esas conexiones se asemejaban a las trabadas por ratones jóvenes.

¿Hasta dónde llega la habilidad de un ratón experto?

Luego, Ya-Ping Tang y otros integrantes de mi equipo se dedicaron a valorar el aprendizaje y las capacidades de memorización de nuestros ratones *Doogie*. Empezamos por estudiar uno de los aspectos fundamentales de la memoria, la capacidad de reconocer un objeto. Colocamos a los ratones *Doogie* en una caja abierta. Dejamos que exploraran dos objetos durante cinco minutos. Varios días después, reemplazamos uno de los objetos por otro nuevo; volvimos a introducir ratones en la caja. Los genéticamente modificados recordaban el objeto viejo y dedicaban su tiempo a explorar el nuevo. Los ratones normales, sin embargo, dedicaban igual tiempo a explorar ambos objetos, prueba de que el objeto viejo no les era más familiar que el nuevo. Repitiendo los ensayos a intervalos diferentes, vimos que los ratones genéticamente modificados recordaban objetos a lo largo de un intervalo temporal cuatro o cinco veces superior que los ratones normales.

En una segunda fase de pruebas, Tang y yo examinamos la capacidad de los ratones de asociar una descarga suave en sus patas con el hecho de estar en un tipo particular



2. PUNTO DE ENCUENTRO entre dos neuronas, la sinapsis. La hipótesis predominante en torno a la formación del recuerdo implica la intervención de receptores de NMDA, que se asientan en la superficie de la célula postsináptica. Los receptores de NMDA, poros diminutos por donde cursan iones de calcio, pueden vincular dos sucesos a un tiempo —un prerrequisito para fijar un recuerdo— porque se abren sólo cuando reciben las dos señales. La primera señal es la unión del glutamato liberado por la célula presináptica; la segunda, la activación eléctrica por el estímulo emanante de otra neurona que expulsa magnesio del canal del receptor. La entrada de calcio activa las cascadas bioquímicas que terminan por reforzar la sinapsis.

de cámara o escuchar cierto tono. Observamos que la probabilidad de que los ratones *Doogie* quedaran "paralizados" —signo de que recordaban el miedo— era mayor que la de los ratones normales, cuando volvían a la cámara o escuchaban el tono de la prueba varios días después. Deducíase, pues, que los ratones *Doogie* tenían mejor memoria. Pero, ¿aprendían también más deprisa?

El aprendizaje y la memoria representan etapas diferentes de un mismo proceso gradual y continuo, cuyos pasos a menudo no son fáciles de distinguir. Sin memoria no se puede medir el aprendizaje; sin aprendizaje no existe memoria que pueda valorarse. Para determinar si la alteración genética de los ratones *Doogie* les ayudaba a aprender, recurrimos a un protocolo experimental clásico del comportamiento, el aprendizaje de la extinción del miedo.

En la prueba de la extinción del miedo condicionábamos los ratones, igual que antes, en una cámara con descargas; después, colocábamos los animales de nuevo en el ambiente productor de miedo —pero sin las descargas en las patas— una y otra vez. La mayoría de los animales necesitaba unas cinco repeticiones para "desaprender" el nexo entre estar en la cámara de las descargas y recibir una descarga. Los ratones *Doogie* necesitaban sólo dos repeticiones para aprender a no asustarse. También aprendieron a no asustarse con el tono antes que los ratones normales.

La última prueba de comportamiento fue el laberinto acuático de Morris. Se requería que los ratones usaran claves visuales de una cortina del laboratorio para encontrar el lugar de una plataforma oculta en una pequeña pileta de agua lechosa. Esta tarea, ligeramente más complicada, pone en juego muchos factores cognitivos, incluidas habilidades analíticas, aprendizaje y memoria, así como la habilidad para elaborar estrategias. De nuevo los ratones genéticamente modificados ejecutaron mejor la tarea que los ratones normales.

Nuestros experimentos con los ratones *Doogie* confirmaron las predicciones de la regla de Hebb. Sugirieron también que el receptor de NMDA era un interruptor molecular clave para muchas formas de aprendizaje y memoria.

Aunque nuestros experimentos demostraron el papel central de los receptores de NMDA en diversos procesos de aprendizaje y memoria, quizá no sea la única molécula que se halle involucrada. Esperamos que muchas moléculas que cumplan algún papel en el aprendizaje y la memoria se identifiquen en los años venideros.

A raíz de la publicación de nuestros resultados, muchos han querido saber si esos hallazgos significan que pronto habrá niños más listos genéticamente modificados o píldoras que nos conviertan en genios. La respuesta es sencillamente no.

La inteligencia suele definirse como la capacidad para resolver problemas. Aunque aprendizaje y memoria son partes integrantes de la inteligencia, ésta es un rasgo complejo que abarca el razonamiento, habilidades analíticas y la capacidad para generalizar información previamente aprendida, entre otros factores. Muchos animales tienen que aprender, recordar, generalizar y resolver diversos tipos de problemas, como negociar su territorio, prever la relación entre causa y efecto, y evitar alimentos venenosos. El hombre posee muchos tipos de inteligencia, como la que hace a uno un buen matemático, un biólogo molecular o un extraordinario jugador de fútbol.

Por ser el aprendizaje y la memoria dos componentes fundamentales para la resolución de problemas, no debiera sorprendernos que una potenciación de dichas capacidades condujera a una mejora de la inteligencia. Pero los diversos tipos de inteligencia significan que la clase y grado de potenciación dependen mucho de la naturaleza de las capacidades de aprendizaje y memoria involucradas en una determinada tarea. Animales con una mayor facultad para reconocer objetos y resolver laberintos en el laboratorio, por ejemplo, podrían encontrar antes alimento y trasladarse de un lugar a otro si se encuentran en libertad. Podrían tener también una mayor facilidad para huir de los predadores o incluso evitar caer en una trampa. Pero la ingeniería genética nunca podrá convertir un ratón en un genio capaz de tocar el piano.

Nuestro descubrimiento de que una manipulación genética menor convierte esa diferencia mensurable en todo un conjunto de tareas de aprendizaje y memoria apunta hacia otra posibilidad: que el NR2B se convierta en blanco de fármacos para tratar alteraciones de la memoria relacionadas con la edad. Una aplicación inmediata sería la búsqueda de compuestos que mejoraran la memoria

EN BUSCA DE UN FARMACO QUE SOSTENGA LA MEMORIA
Los ratones expertos son sólo el primer paso

¿Se fabricará pronto una píldora que nos ayude a recordar dónde hemos dejado las llaves del coche? No. Aunque se está buscando con tesón. Joe Z. Tsien se ha asociado con el empresario Charles Hsu para formar una compañía basada en el descubrimiento reseñado en el artículo.

La empresa, Eureka Pharmaceuticals, tiene su sede en la oficina de Hsu, en el grupo Walden, en San Francisco. La compañía se dedica a la aplicación de la genómica, a la búsqueda de moléculas que son blancos potenciales de fármacos con que puedan tratarse alteraciones del sistema nervioso central, como la pérdida de memoria y la demencia. “Pensamos que las herramientas que Joe y sus colaboradores han desarrollado pueden traducirse pronto en bases para descubrir tratamientos de enfermedades”, dice Hsu, presidente de Eureka.

El primer objetivo de Eureka es el receptor de NMDA —que Tsien y sus colaboradores manipularon genéticamente para crear sus ratones *Doogie*—, aunque la compañía buscará otras dianas. El receptor, un poro que permite la entrada del calcio en las células nerviosas, constituye un prerrequisito para el fortalecimiento de la conexión entre dos células nerviosas.

A lo largo de los últimos diez años, varios laboratorios farmacéuticos han ensayado con fármacos potenciales contra la apoplejía que hacen descender la actividad del receptor de NMDA. Cuando se restringe la cantidad de sangre en el cerebro, algo que ocurre con el coágulo que bloquea la arteria, las neuronas liberan mucho glutamato, un compuesto que las células usan para comunicarse. En un fenómeno de excitotoxicidad, el exceso de glutamato se une a receptores de NMDA en otras neuronas, permitiendo que una oleada de calcio fluya hacia el interior de células distintas. Sumado a la falta de oxígeno, se provoca la muerte celular.

Hasta ahora, sin embargo, la búsqueda de bloqueadores del receptor de NMDA que podrían constituir fármacos del tratamiento de la apoplejía ha sido “increíblemente desalentadora”, apunta Robert C. Malenka, de la Universidad de Stanford. El problema, explica, estriba en encontrar un compuesto que se una precisamente en el lugar correcto del receptor NMDA y sólo de la manera adecuada, sin causar otros efectos neurológicos. (Al fin y al cabo, la fenilciclidina, una droga alucinógena, se une a ese mismo receptor.)

La ineficacia de los bloqueadores del receptor de NMDA contra el trombo cerebral —unido a la posibilidad de que los agentes que se enlacen con el receptor resulten tóxicos— ha apagado el entusiasmo de quienes soñaban con el desarrollo de fármacos que incrementaran la memoria y el aprendizaje mediante la activación del receptor. “Que yo sepa, nadie está considerando seriamente regular hacia arriba la actividad del receptor de NMDA para elevar la memoria”, dice Malenka. “Pero puede ocurrir que alguien salga un día con el fármaco mágico que trabe al receptor como debe.”

Una situación más plausible, la perseguida por Tsien, podría ser el desarrollo de fármacos que de una manera sutil modulen la actividad del receptor NMDA, sin unirse a él directamente, señala Ira B. Black, de la Universidad de Medicina y Odontología de Nueva Jersey. Black estudia un compuesto natural, un factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF), que aumenta la probabilidad de que segmentos del receptor de NMDA tengan un grupo fosfato unido. Los receptores de NMDA con grupos fosfato son, a buen seguro, más activos que los que carecen de ellos.

Sin embargo, la mayoría de los neurocientíficos coinciden en que la búsqueda de un fármaco que eleve el aprendizaje y la memoria sin efectos secundarios tardará en llegar.

—Carol Ezzel, de la redacción.

al estimular la actividad o cantidad de moléculas de NR2B en pacientes con un organismo saludable, aunque dotado de un cerebro que empieza a sentir con el envejecimiento los efectos de la demencia senil. Ese tipo de fármacos podría mejorar la memoria en pacientes moderadamente afectados por la enfermedad de Alzheimer u otras demencias. Se trataría de estimular la función de la memoria de las neuronas que quedan, modulando y potenciando la actividad NR2B de las células. Por supuesto, en la creación de tales medicinas se tardará un decenio, por lo menos, no sin antes resolver numerosas incógnitas. Tendrán que sopesarse los posibles efectos secundarios de estos fármacos en el hombre, aunque el aumento de actividad NR2B en los ratones *Doogie* no parece haber sido causa de toxicidad, apoplejía o infarto.

Pero si el cerebro necesita más NR2B para que funcionen mejor el aprendizaje y la memoria, ¿por qué ha dispuesto la naturaleza que su concentración disminuya con la edad? Varias son las hipótesis en que se trabaja. Para unos, el cambio de NR2B a NR2A evita que la capacidad de la memoria del cerebro se sobrecargue. Para otros, el autor incluido, el cambio es evolutivamente adaptativo desde el punto de vista de la población, porque limita la probabilidad de que los individuos viejos —que supuestamente ya se han reproducido— compitan con éxito con los más jóvenes en la búsqueda de recursos como el alimento.

La idea de que la selección natural no prime una mejor capacidad de aprendizaje y memoria en los adultos tiene profundas implicaciones. Significa que las modificaciones genéticas de atributos mentales y cognitivos como el aprendizaje y la memoria pueden abrir un nuevo camino a la evolución de la biología genética y quizás a la civilización, con una velocidad sin precedentes.

JOE Z. TSIEN enseña biología molecular en la Universidad de Princeton. Inició su formación en la Universidad de la China Oriental en Shanghai y se doctoró en la de Minnesota. Se ha especializado en el desarrollo de terapias para alteraciones de la memoria relacionadas con la edad.

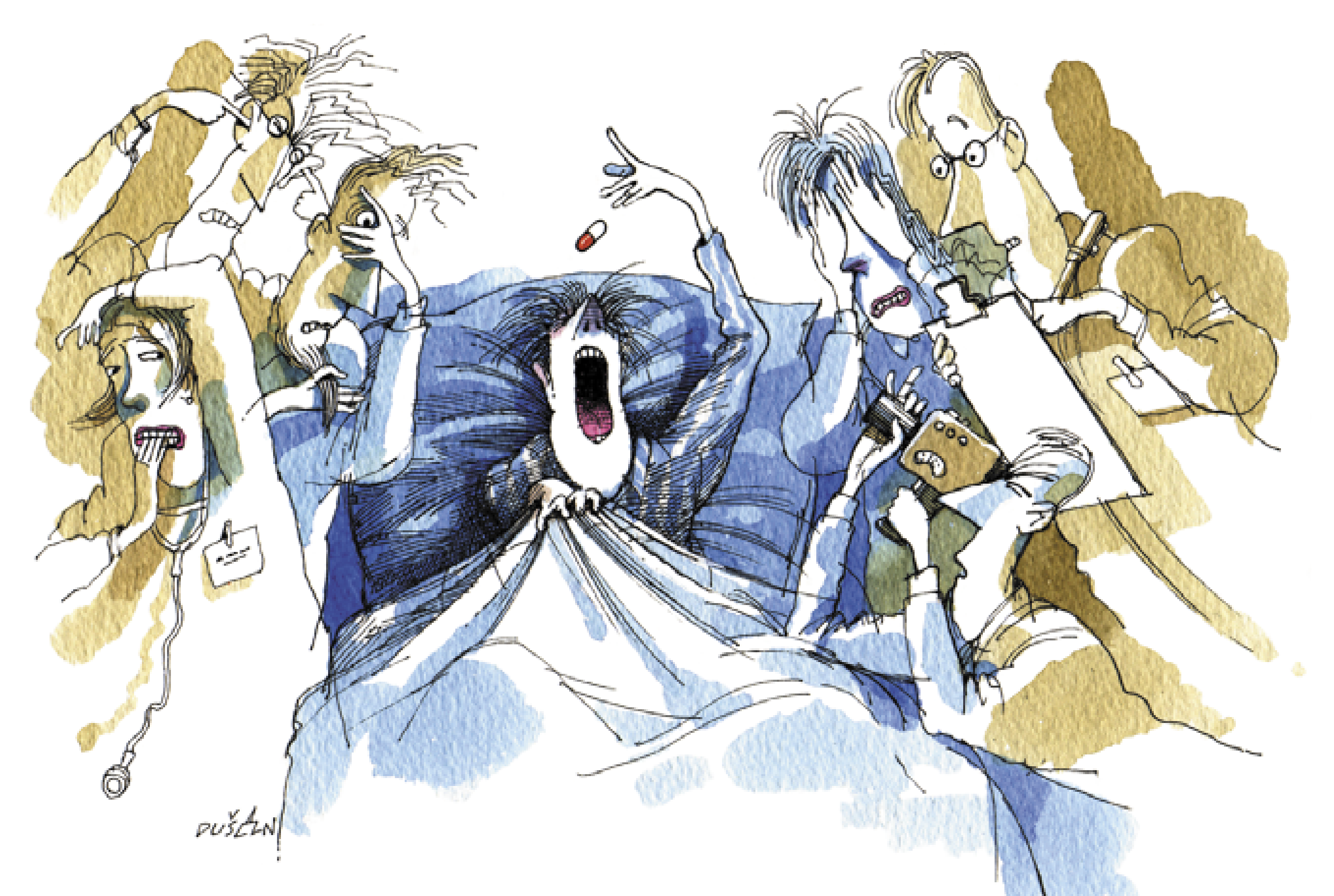
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORGANIZATION OF BEHAVIOR: A NEUROPSYCHOLOGICAL THEORY. Donald O. Hebb. John Wiley, 1949.

MEMORY AND BRAIN. Larry R. Squire. Oxford University Press, 1987.

LONG-TERM POTENTIATION — A DECADE OF PROGRESS? Robert C. Malenka y Roger A. Nicholl en *Science*, volumen 285, n.º 5435, páginas 1870-1874; 17 de septiembre de 1999.

ENHANCING THE LINK BETWEEN HEBB’S COINCIDENCE DETECTION AND MEMORY FORMATION. Joe Z. Tsien en *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 10, n.º 2; abril de 2000.



Naturaleza y alcance de los ensayos clínicos

El trayecto desde la investigación médica inicial hasta el frasco del anaquel de la farmacia es complejo, caro y lento. ¿Podemos agilizar el proceso de la experimentación clínica?

Justin A. Zivin

Uno de los acontecimientos médicos más sonados de los últimos cinco años ha sido, sin duda, la expectación suscitada en torno a la angiostatina y la endostatina, que los medios de comunicación hacían capaces de curar el cáncer, una afirmación prematura. Ambas sustancias, que redujeron drásticamente el tamaño de los tumores en un grupo de ratones de laboratorio, ocuparon los titulares varias semanas de la primavera de 1998, para ir luego perdiendo interés.

Sin embargo, los científicos siguieron de forma tenaz y metódica el estudio de estos potentes medicamentos. Año y medio después, en septiembre de 1999, los médicos estaban al fin preparados para someter a prueba la endostatina en el hombre. En poco tiempo, la fase I del ensayo clínico se llevó a cabo en Boston, Houston y Madison. Salvo complicaciones imprevistas, las pruebas continuarán a lo largo del año en curso. Si no aparecen obstáculos y se demuestra que la endostatina es un tratamiento seguro y eficaz, pasarán todavía varios años antes de poder recetarla a los pacientes.

Otra de las noticias habituales de primera plana es la promesa de la terapia génica. Sin embargo, casi cincuenta años después de que comenzara la revolución en biología molecular, no se cuenta con ningún tratamiento de este tipo. Sí se realizan pruebas de terapia génica y con frecuencia es objeto de profundas investigaciones. Las quejas no están motivadas por los lentos progresos en la investigación, sino por el posible perjuicio que los ensayos causen

JUSTIN A. ZIVIN es profesor del departamento de neurología de la Universidad de California en San Diego, en cuyo hospital clínico ejerce. Realizó sus estudios de medicina y el doctorado en la Universidad de Northwestern. Zivin ha sido también consejero de numerosos laboratorios farmacéuticos y de empresas de biotecnología, pero nunca ha sido accionista de ninguno de ellos.

a los interesados. En septiembre de 1999, un joven que participaba en la fase I de un ensayo clínico sobre una terapia génica de una rara alteración metabólica, la deficiencia de ornitintranscarbamilasa, murió a raíz de las complicaciones provocadas por el tratamiento. En los meses siguientes, se hicieron públicos varios informes sobre otras muertes ocurridas en el transcurso de ensayos clínicos con terapia génica. El debate sobre estas tragedias se centró en el modo en que se habían llevado a cabo los ensayos y en la posibilidad de que una mala práctica de los investigadores hubiera conducido a esas muertes.

El ensayo clínico tripartito, proceso requerido para juzgar la eficacia y seguridad de tratamientos potenciales, es una tarea ardua. Los experimentos necesarios pueden durar más de 10 años y costar cientos de millones de dólares. Los ensayos que demuestran la inviabilidad de un tratamiento son mucho más numerosos que los que demuestran su operatividad, pero ambos cuestan lo mismo. Aunque no se conoce el número exacto porque a los laboratorios farmacéuticos no les gusta informar sobre sus fallos, podemos afirmar, sin pecar de exageración, que se han probado miles de medicamentos y procedimientos médicos desde comienzos de los noventa.

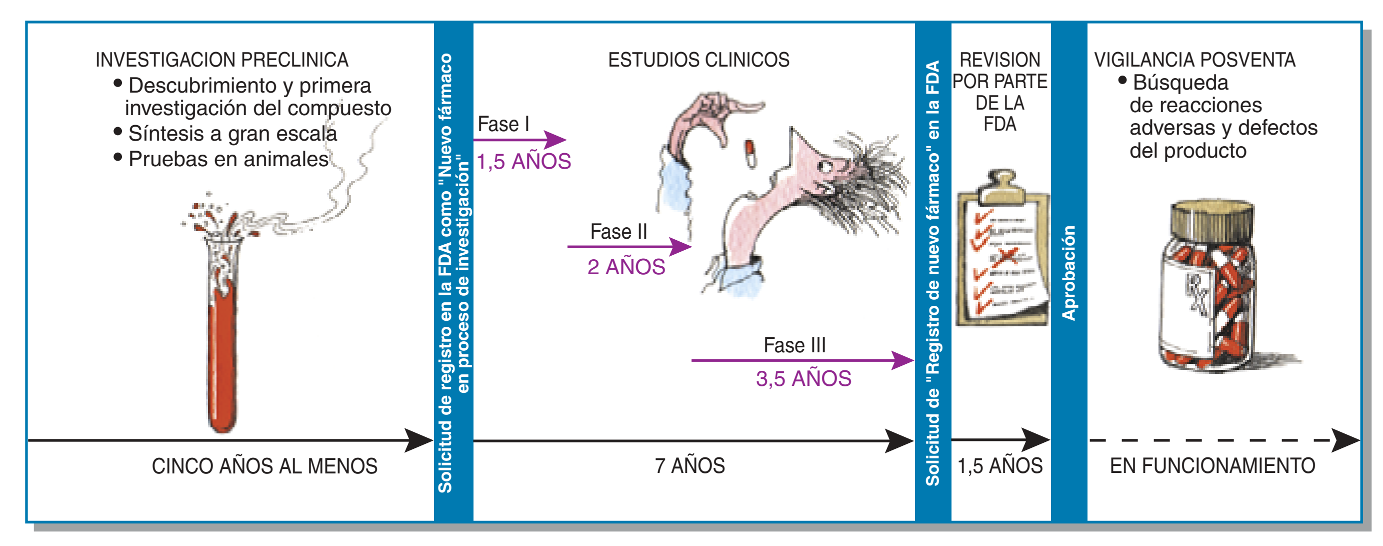
La sociedad sabe muy poco sobre la metodología seguida en los ensayos y sus fundamentos científicos. Lo que no obsta para que se le pida que arriesgue su salud y quizá su vida participando en un ensayo clínico, a veces con poco tiempo para tomar decisiones bien ponderadas. Además, en los últimos años los ensayos en humanos se han convertido en algo más que en una manera de someter a contrastación nuevos fármacos. Han adquirido un papel importante en la administración de cuidados sanitarios: muchos pacientes ven su participación en un ensayo como la única vía de obtener medicaciones experimentales que consideran potencialmente salvadoras de su vida.

Sobre el modo en que se realizan los ensayos clínicos hay que considerar el dinero, el tiempo y los posibles conflictos de los intereses involucrados. ¿Pueden los laboratorios farmacéuticos empujar a los investigadores a que informen de los resultados obtenidos tan sólo de la manera más favorable para las compañías? ¿Es acaso factible explicar a un paciente los riesgos potenciales (un requisito que asegura su "consentimiento informado") cuando el objetivo del ensayo busca precisamente conocer tales riesgos? ¿Cómo llegar a un equilibrio entre el deseo de probar un fármaco con el de conseguir tratamientos seguros disponibles para los pacientes lo antes posible? La lista de preguntas continúa. Bajo la presión del público, la administración y las empresas que financian la investigación médica, los expertos se esfuerzan por rebajar el coste y la duración del proceso, sin sacrificar los controles de calidad obligados para proteger a los pacientes y confirmar que los nuevos tratamientos sean seguros y eficaces.

Durante más de veinte años he observado cientos de ensayos clínicos



LA ENDOSTATINA, un posible fármaco anticanceroso, se encuentra en la fase I de un ensayo acometido por el



1. EL TIEMPO NECESARIO para desarrollar un fármaco acostumbra abarcar varios años y comprende desde la investigación preliminar en el laboratorio hasta los ensayos en humanos, la posterior revisión por la autoridad sanitaria de control y, por último, la supervisión de los fármacos ya a la venta. Los esfuerzos llevados a cabo por la administración sanitaria y los investigadores clínicos han acortado algo el, de suyo, largo proceso.



instituto general de oncología de la Universidad de Wisconsin.

FASE 1: Análisis de la seguridad

Número de voluntarios: 10-100 personas sanas

Qué esperan averiguar los investigadores: la dosis máxima segura del fármaco

Duración habitual: Año y medio

Coste habitual: 1700 millones de pesetas

En la primera etapa del ensayo clínico, se reúne información sobre la seguridad de la administración de un fármaco y, confirmada ésta, sobre la cuantía tolerable. Administrar por vez primera un fármaco no deja de ser un acto preocupante, pues los voluntarios (sanos y a quienes se paga por regla general) corren un riesgo cierto. La dosis inicial suele ser muy baja para conjurar la posibilidad de una reacción grave. Mas, a medida que los médicos aumentan la dosis, crece el peligro potencial de complicaciones. Si existe la posibilidad de efectos secundarios muy graves, la fase I se experimenta en pacientes cuyo tratamiento necesite en teoría el fármaco. El riesgo potencial se equilibra con el posible beneficio.

Antes de pasar al hombre ha quedado demostrada la seguridad del fármaco en animales, pero éstos no pueden expresar si sienten vértigo, náuseas o perturbaciones psiquiátricas. Los seres humanos pueden y lo hacen con frecuencia. Y aunque tal resultado es muy raro, a veces los voluntarios tienen que recibir tratamiento el resto de su vida por culpa de los efectos secundarios que no han aparecido en animales.

El equipo investigador controla a los participantes, observa su comportamiento y les pregunta sobre las sensaciones experimentadas. Para descubrir los problemas con rapidez, toman la tensión arterial y la temperatura, recogen muestras de sangre y de orina y vigilan cualquier otra señal de peligro puesta de relieve por los estudios en animales. Miden también el nivel del fármaco en el torrente sanguíneo o en los tejidos para determinar su distribución en el organismo, la velocidad con que alcanza un nivel terapéutico y el modo de su eliminación. La combinación de todos estos datos ayuda a determinar el régimen seguro de dosificación.

—J. A. Z.

desde diferentes perspectivas: desde un comité de investigación, como neurólogo clínico y como experto en ensayos clínicos. He sido asesor del Instituto Nacional de la Salud, Oficina de Alimentación y Fármacos de Estados Unidos (FDA) y de varios laboratorios farmacéuticos. He sido, asimismo, asesor de una compañía de gestión de la investigación, que podía ser contratada por empresas farmacéuticas para organizar ensayos clínicos. Durante estos años, cuantos nos hemos visto implicados en ensayos clínicos hemos intentado desarrollar mejoras o alternativas al ensayo clínico tradicional. Algunas de estas técnicas pueden ayudar a resolver problemas corrientes, pero creo que el ensayo clínico en tres fases, normalizado y controlado sigue siendo el modo más seguro de someter a prueba fármacos y procedimientos médicos nuevos.

La protección de los pacientes

El recurso a los ensayos clínicos ciegos o controlados constituye un motivo principal de queja acerca de la fórmula habitual utilizada para someter a prueba terapias experimentales en humanos. En principio, ni los médicos ni los pacientes saben si un sujeto forma parte del grupo de tratamiento o del grupo control (que recibe un placebo o la mejor terapéutica ya comprobada disponible); son "ciegos" respecto a la realización del experimento con fármacos. El problema se complica con la naturaleza aleatoria de la muestra, con la asignación, al azar, de los pacientes al grupo experimental o al grupo control. Por mor de ello, muchos pacientes se sienten cobayas impotentes frente a los poderosos laboratorios farmacéuticos. Las compañías sostienen que sólo la suerte habría llevado a estos pacientes a recibir los tratamientos más recientes y vanguardistas.

Si los investigadores tuvieran visos claros de que el fármaco en cuestión es un tratamiento mejor, no necesitarían probarlo. Para evitar el sesgo de los resultados finales, exige el rigor científico que se realice, y sea aleatoria, la división de sujetos entre el grupo experimental y el grupo control. Si el grupo experimental lo constituyeran, sobre todo, pacientes en quienes hubiera fallado cualquier otro fármaco (los pacientes más graves), el medicamento experimentado podría parecer menos eficaz que el placebo, aun cuando no lo fuera, tan sólo porque los pacientes que lo reciben comienzan el experimento en peor estado de salud. Por contra, si los responsables del ensayo clínico, de forma consciente o inconsciente, administraran el fármaco experimentado a pacientes más saludables, podría parecer más eficaz.

Mas lo que es esencial para la ciencia, no siempre tiene sentido para los pacientes, sobre todo los aquejados de enfermedades mortales. Con el fin de proteger a los pacientes de posibles abusos y defender sus intereses, los organizadores de los ensayos incorporan muchos controles de vigilancia en su planificación. En primer lugar, los médicos están obligados por ética profesional a proporcionarles la mejor atención posible, formen o no parte del ensayo. A los médicos nunca se les pide que aporten sujetos para un estudio experimental, ni los pacientes pueden ser obligados a incorporarse a uno de ellos. Cuando alguien decide hacerlo, los médicos deben proporcionarle una completa explicación, oral y escrita, acerca de la naturaleza del estudio y toda la información disponible sobre riesgos y beneficios potenciales de la participación. Si los pacientes o sus representantes legales están de acuerdo en continuar, han de rubricarlo con su firma. En este procedimiento de obtención del consentimiento informado, los pacientes siempre tienen el derecho de negarse a participar o retirarse de un ensayo en cualquier momento.

Debido a la imposibilidad de conocer por adelantado todos los posibles efectos secundarios de un fármaco experimental, los hospitales de los

países avanzados en los que se llevan a cabo cuentan con comités de evaluación institucionales. El segundo nivel de vigilancia consiste habitualmente en un comité de cuidadores, defensores del paciente u otras personas interesadas no profesionales (abogados o teólogos moralistas). Los comités deben aprobar una investigación antes de que ésta se lleve a cabo en un lugar determinado; si sus miembros tienen alguna objeción acerca de cómo se desarrolla el experimento, pueden detenerlo o solicitar cambios en su ejecución.

Con el fin de proporcionar un nivel adicional de protección al paciente, cada ensayo incluye por regla general un comité de vigilancia de protección de datos. Este grupo de médicos y estadísticos trabaja independientemente de los que financian el fármaco experimentado y de los investigadores. Vigilan el ensayo, controlan de forma constante la seguridad y periódicamente evalúan otros aspectos. Si observan que el grupo tratado va mucho mejor que el control, puede recomendar que el ensayo concluya.

En algunos casos, los médicos pueden ofrecer a sus pacientes tratamientos experimentales al margen de un ensayo clínico. Se pueden administrar tratamientos que no han sido aprobados por la FDA en pacientes muy enfermos por lo que los médicos denominan “uso compasivo”. No obstante, debido a que dicho tratamiento no ha sido comprobado adecuadamente en el hombre, sus destinatarios no pueden tener certeza de que el fármaco o el nuevo procedimiento les ayudará o será seguro. Además, los resultados de tales experimentos no ayudarán a nadie más, ya que no han formado parte en sentido estricto de un experimento clínico.

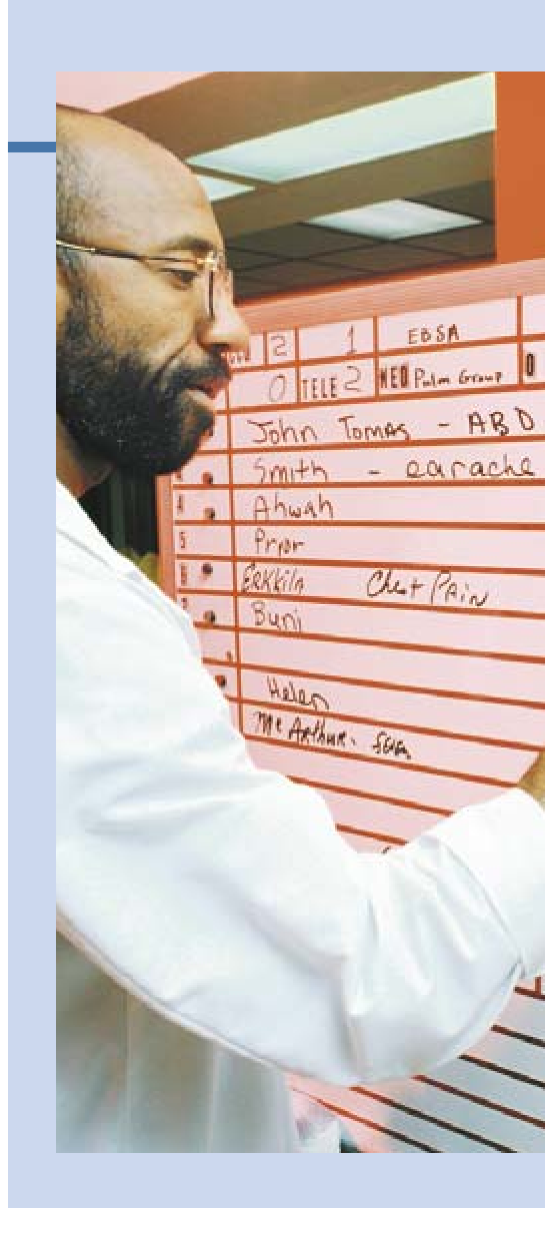
Por lo que ahora sabemos sobre los experimentos de terapia génica en fase I en los que hubo fallecimientos, algunos comités de vigilancia estuvieron mal informados. En algunos de los que ahora se examinan (varios de ellos se han interrumpido), los investigadores no informaron al NIH de algunos riesgos para la salud asociados al tratamiento y que se habían observado previamente en ensayos con animales o en otros pacientes. (La mayoría de los investigadores habían avisado a la FDA de ciertas complicaciones, pero la agencia no divulga datos de los ensayos.)

Tales notificaciones, requeridas por la legislación federal, podrían haber detenido los ensayos y evitado las muertes. Por desgracia, cuando los investigadores piensan que han descubierto una “bala mágica” —terapia que cura con una seguridad absoluta— puede resultarles difícil reconocer los riesgos asociados a un ensayo clínico. Pero las dificultades científicas que se encontrarán con mayor probabilidad al desarrollar terapias génicas son similares a las habitualmente observadas al ensayar tratamientos tradicionales. Los recientes fallecimientos recordarán a todos cuán imprescindible resulta llevar a cabo nuestros estudios según normas bien establecidas.

El público, los médicos y las compañías coinciden en que los fármacos potenciales deben ser comprobados con rapidez, para hacerlos asequibles cuanto antes. Las consideraciones del público son de índole humanitaria. Pero las razones del médico pueden ser mixtas. Desea que sus enfermos dispongan del mejor tratamiento, pero también se beneficia económicamente con la incorporación de pacientes al ensayo, ya que es frecuente que las compañías paguen a los médicos por cada nuevo sujeto incorporado a la prueba. Los sucesos acaecidos durante los ensayos de terapia génica revelan que el orgullo profesional también puede estar en juego. Los laboratorios farmacéuticos, por supuesto, tienen un definitivo interés financiero en realizar los ensayos con rapidez: cuanto más se prolongue un ensayo, más cuesta. Un ensayo corto y positivo les permite empezar a vender su producto antes y adelantarse en la protección de la patente de sus fármacos durante más tiempo.

Aceleración del proceso

La celeridad con que puede llevarse a cabo un ensayo depende sobre todo del número de investigadores y de pacientes participantes. Cuanto más rápido se recojan los datos, antes se interpretará la información. Esto es cierto sobre todo en terapéuticas que pueden ofrecer beneficios importantes a sólo un número reducido de pacientes y para las terapias que únicamente aportan modestos resultados a mucha gente. Por ejemplo, tomar una aspirina al día previene el ataque al corazón cada año en un 1,5 % de los pacientes que ya han sufrido un episodio con anterioridad. Sólo si se administra aspirina a un número muy elevado de pacientes, podrá demostrarse la realidad de dicho efecto. Aunque este



beneficio puede parecer pequeño, el gasto anual en aspirinas es exiguo, mientras que el cuidado de un superviviente de un ataque al corazón cuesta varios millones de pesetas al año. Y desde una perspectiva amplia, sobre un total de un millón de casos, unas 15.000 personas se beneficiarán del tratamiento con aspirina.

Con el fin de incorporar el mayor número de pacientes lo antes posible, los ensayos se acometen en diversos lugares del mundo. La extensión geográfica significa un número mayor y más plural de sujetos, que refuerza la representatividad de los destinatarios potenciales de la medicación o protocolo médico.

Pese a los beneficios, los ensayos internacionales no han quedo exentos de crítica. Denuncian sus detractores que algunos laboratorios farmacéuticos se aprovechan de la gente de los países en vías de desarrollo, sometiendo a prueba en estas regiones



FASE 2: Se establece el protocolo

Número de voluntarios: 50-500 pacientes con la enfermedad sujeta a estudio

Qué esperan averiguar los investigadores: Quiénes y cuántos deben incluirse en la fase final de la prueba; últimos puntos de la investigación; estimaciones provisionales de las dosis eficaces y de la duración del tratamiento

Duración habitual: 2 años

Coste habitual: 3400 millones de pesetas

El objetivo principal de la fase II de la prueba es práctico: encontrar las condiciones experimentales que permitirán en la etapa postrera del ensayo obtener un resultado definitivo. (No se propone, pues, comprobar que el fármaco constituye un remedio eficaz.) Se busca establecer la pauta óptima de dosificación. De entrada ha de estipularse la conclusión final principal. Las conclusiones finales describen resultados inequívocos que indican con exactitud lo que puede hacer el tratamiento. Por ejemplo, la conclusión final habitual buscada cuando se prueba un nuevo antibiótico es si el paciente se halla exento de infección tras el tratamiento. Muchas dolencias, sin embargo, no pueden curarse tan pronto. Por ello, puede aceptarse por conclusión final alternativa averiguar si la progresión del sida, valga el ejemplo, se enlentece o si baja la mortalidad por cáncer.

La fase II marca la introducción del grupo control en el ensayo. Casi todas las enfermedades presentan un curso evolutivo muy variable, con remisiones espontáneas a veces. Los investigadores han de poder distinguir entre una remisión natural y los efectos del tratamiento. La inclusión de un grupo control, que recibe un placebo o el mejor tratamiento disponible hasta ese momento, permite establecer esa comparación.

A la vez, gracias al grupo control saben los médicos en qué personas los problemas de salud no guardan relación con el fármaco en cuestión. Por ejemplo, una medicación investigada como tratamiento de la hipertensión puede ser sospechosa de causar náuseas. Pero cualquiera puede sufrir náuseas. Sólo si su incidencia es mucho mayor en el grupo en tratamiento que en el control se considerará un problema.

En el mejor de los casos, ni los médicos ni los pacientes saben que forman parte del grupo de tratamiento o del grupo control; en otras palabras, están "ciegos" respecto al tipo de terapéutica administrada. Durante la fase II, los investigadores trabajan para asegurarse de que el procedimiento ciego se ejecuta con éxito. En ese orden, si se utiliza una píldora placebo, se procura que su presentación sea la misma que la del fármaco y se trata a los pacientes de igual forma con el fármaco que con el placebo.

Hay casos, no obstante, en que resulta de todo punto imposible llevar a cabo un ensayo ciego. Si el fármaco investigado causa algún tipo de efecto secundario leve, los pacientes pensarán en seguida que pertenecen al grupo de tratamiento. Por regla general no se reputa ético someter a un paciente a anestesia y a una operación placebo cuando se está evaluando un procedimiento quirúrgico. Sin embargo, los investigadores pueden compensar esta falta de ceguera y la fase II les permite resolver cómo hacerlo antes de entrar en la fase III. *—J. A. Z.*

LOS DATOS DE CADA PACIENTE deben revisarse cuidadosamente durante la fase II, cuando los organizadores del ensayo ajustan la dosis y duración del tratamiento que se aplicará en la fase III.

fármacos nuevos que pueden salvar la vida (sobre todo en el caso del sida), pero que luego no les son accesibles por su excesiva carestía. Pero, por penoso que parezca, el procedimiento no refleja un ensayo clínico pobremente diseñado. Sólo el que puede o no acceder a la terapia sí refleja la situación política y económica. Debe asegurarse con medidas legales y financieras que los pacientes puedan conseguir las medicinas que necesitan y no les resulte prohibitivo comprar.

Con la multiplicación de los ensayos vamos acumulando mayor cantidad de información. Los datos que aporta cada paciente sobrepasan a menudo las cien páginas de un cuaderno de notas. El proceso que conlleva recoger esa cosecha y su comprobación representa un capítulo considerable del precio del ensayo.

Una opción alternativa, conocida como ensayo sencillo amplio, intenta remediar en parte este problema. Con este método, los médicos recogen sólo los detalles imprescindibles, habitualmente información identificativa y una lista sumaria de comprobación que indica si el paciente se encuentra mejor, igual o peor. El resultado ya completo se remite por tarjeta postal al centro coordinador. Los ensayos sencillos y amplios ofrecen un plan más económico de recogida de datos de un elevado número de pacientes; tales ensayos trabajan con decenas de miles de sujetos por una pequeña parte de lo que costaría con otros métodos. Y con esa muestra extensa se pueden detectar incluso los efectos más leves de la medicación.

Los ensayos sencillos y amplios adolecen, sin embargo, de un grave inconveniente. No pueden utilizarse para comprobar otro nuevo fármaco candidato, ya que se desconocen los efectos secundarios. Atenta contra la moral administrar a un elevado número de pacientes una medicación experimental cuya seguridad no se ha corroborado y cuyos beneficios se desconocen. Por ello, suelen llevarse a cabo ensayos sencillos y amplios para evaluar la eficacia correspondiente de tratamientos conocidos y aprobados.

Los ensayos clínicos más rápidos son ya una realidad. Según un informe del Centro Tufts para el Estudio del Desarrollo de Fármacos aparecido en 1999, la duración media de los ensayos clínicos realizados entre 1996 y 1998 fue de 5,9 años, frente a los 7,2 de los acometidos entre 1993 y 1995. Pero a pesar de las medidas tomadas para ahorrar tiempo, los ensayos clínicos aún representan una gran inversión de tiempo y dinero. Por ello, cuando los resultados son ambiguos, los responsables de un ensayo clínico intentan por regla general extraer alguna información útil de su arduo trabajo.

A menudo, un ensayo en fase III mostrará una tendencia favorable a un fármaco, pero el efecto será insuficiente para servir de prueba estadística convincente. En muchos casos, una serie de ensayos adicionales ofrece también resultados mixtos. Cuando eso acontece, los estadísticos han desarrollado métodos que acumulan datos procedentes de todos los ensayos previos y que conducen a meta-análisis. Se trata, sin embargo, de evaluaciones controvertidas. No es fácil aceptar la defensa de un resultado valioso obtenido a partir de un conjunto de lo que son, prácticamente, errores. Los interrogantes sobre la validez del meta-análisis no acaban ahí: la técnica puede llevar a sesgos potenciales según los estudios seleccionado para su inclusión y comparación. Los resultados obtenidos con el meta-análisis pueden ser útiles para interpretar un número elevado de datos conflictivos, pero no deben considerarse definitivos.

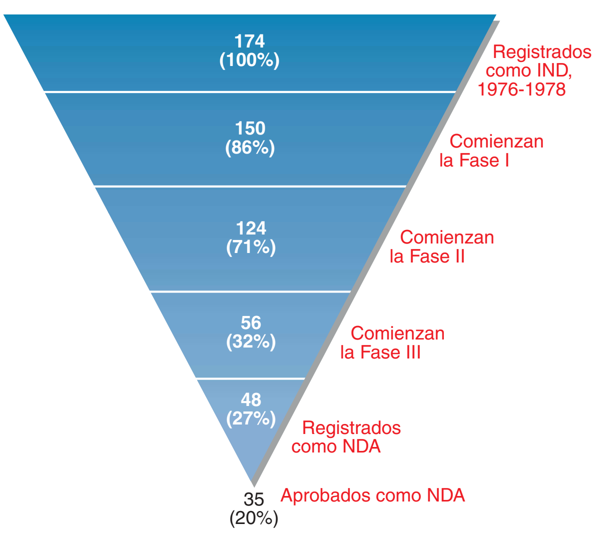
La financiación

El dinero —empresa subvencionadora y explotadora— apunta detrás de todo ensayo clínico. Durante años, los laboratorios farmacéuticos han realizado por su cuenta la mayor parte del trabajo de los ensayos, contratando médicos para organizarlos y ejecutarlos, observadores para verificar la recogida correcta de los datos, estadísticos para analizar los resultados, informáticos para introducir los resultados en las bases de datos y personal de apoyo para resolver las tareas administrativas relacionadas con la coordinación del trabajo. Todo ello sumado a médicos locales y personal sanitario que atienden a los enfermos implicados en el ensayo. El precio de esta tarea sube con rapidez y ronda los cientos de millones de dólares. A nadie debe sorprenderle que los laboratorios farmacéuticos deseen recobrar cuanto antes lo invertido.

No abundan los casos de conducta deshonrosa de los laboratorios farmacéuticos que llevan a cabo ensayos clínicos, pero algunos han salido a la superficie. Los investigadores se han quejado de que los laboratorios que los financian limitan la comunicación con sus colegas y con la sociedad si el tratamiento parece que no es eficaz. Una vía alternativa a la financiación de la industria sería que la administración sanitaria subvencionara todos los ensayos clínicos. Tal determinación, que ocurre de vez en cuando, reduce drásticamente las posibilidades de aprovecharse del personal que realiza el ensayo y asegura una mayor finura de los resultados.



Pero no parece sobradamente justificado gastar el dinero de los impuestos en la investigación de nuevos fármacos, muchos de los cuales revertirán grandes beneficios a los laboratorios farmacéuticos. Años atrás, el apoyo del gobierno solía quedar reservado para los ensayos de fármacos que no producían grandes beneficios o para los estudios muy hipotéticos, que entrañaban un riesgo demasiado elevado para la industria. Fue el caso del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, que financió los ensayos que indicaban que la aspirina reducía el riesgo de ataque al corazón en pacientes que ya habían sufrido uno. Aunque el número de pacientes que se benefician de este hallazgo es muy alto, la aspirina es tan barata, que ninguno de los fabricantes quiso financiar los estudios, ya que los beneficios subsiguientes no compensarían los costes.



2. LOS RENDIMIENTOS MENGUANTES son la norma en un proceso de ensayo clínico. Tan sólo un 20 % de los "nuevos fármacos en proceso de investigación", o IND, solicitudes registradas en la administración sanitaria norteamericana, llegan al último escalón, luego de muchos años y muchas pruebas: la aprobación de una "solicitud de nuevo fármaco" (NDA) que da a un tratamiento el pase para su venta al público.

En los últimos años se ha intentado una tercera aproximación, a saber, dejar los ensayos en manos de organizaciones de investigación contratadas, las OIC. Estas empresas trabajan independientemente de los laboratorios farmacéuticos y son contratadas de forma específica para dirigir los ensayos clínicos. Las OIC acostumbran ceñirse a gestionar los ensayos y a menudo están preparadas para someter a prueba varios fármacos en muchos países a la vez. En teoría, por tanto, las OIC serán más eficaces. Delegando en ellas, los laboratorios farmacéuticos podrán reducir los costes que suponen estudios prolongados en numerosos hospitales. Y si un programa de desarrollo de un medicamento falla, la compañía no tiene que despedir ni traspasar al elevado número de personas necesarias para llevar a cabo la investigación.

Debido a que las OIC no se benefician de la venta de los fármacos, sufrirán menos conflictos de intereses que los fabricantes. Sólo cobran sus servicios.

En su esfuerzo por eludir posibles problemas derivados de conflictos financieros, la mayoría de las sociedades médicas, así como las principales revistas, solicitan ahora a los investigadores un informe que revele la financiación del trabajo presentado,



FASE 3: La prueba final

Número de voluntarios: 300-30.000 pacientes o más con la enfermedad objeto de estudio

Qué esperan averiguar los investigadores: Si el tratamiento es eficaz y qué efectos secundarios importantes tiene

Duración habitual: Tres años y medio

Coste habitual: 7650 millones de pesetas

El estadio final del proceso del ensayo clínico, la fase III, es la más conocida por el público. Cientos, miles, incluso decenas de miles de pacientes han participado en tales pruebas. Al llegar a este punto, los científicos a cargo del ensayo han seleccionado un grupo de pacientes que se espera que se beneficien del tratamiento, han definido el modo en que esto ocurrirá y han determinado la vía más adecuada de administración. La fase III del ensayo puede proporcionar una autorizada confirmación de la eficacia del fármaco.

Si tras un cuidadoso análisis estadístico se comprueba que el fármaco candidato es significativamente más eficaz que el tratamiento de control, nos hallamos ante un ensayo fundamental. Por regla general se necesitan dos ensayos fundamentales para someter a prueba el valor de una nueva terapia ante organismos competentes de la administración sanitaria, norteamericana y europea. No obstante, si el primer resultado es lo suficientemente convincente, basta con un solo ensayo. Si la administración está de acuerdo, aprueba la comercialización del fármaco.

En la hipótesis de un resultado negativo de las pruebas de la fase III, quedan todavía algunas posibilidades. Buceando entre la gran cantidad de datos recogidos, los clínicos quizás encuentren un núcleo de pacientes que sí parezcan haberse beneficiado con el tratamiento. Se acomete entonces otro ensayo en fase III completo, ahora con un grupo más restringido, para comprobar si el fármaco actúa en este caso. En la práctica, los ensayos iniciales en fase III no consiguen demostrar la eficacia de un fármaco y deben llevarse a cabo varios ensayos más. *—J. A. Z.*

A LA ESPERA DE BUENOS RESULTADOS, el médico y el paciente en este ensayo en fase III de tratamiento con láser para la enfermedad esofágica de Barret esperan una respuesta a la pregunta crucial: ¿Funciona el tratamiento?

junto con otros detalles que desvelen cualquier conflicto de intereses. El gobierno norteamericano solicita una declaración similar de los científicos que participan en investigaciones financiadas por él y de los consultores implicados en la concesión de subvenciones o decisiones de gestión de la investigación en organismos públicos. Algunos postulan incluso que los investigadores vendan las acciones que tengan en la compañía farmacéutica patrocinadora del trabajo. No están claros los efectos que estas propuestas, relativamente recientes, tienen, si es que tienen alguno.

Para los próximos años ha quedado ya establecido el marco básico de los ensayos clínicos. Ahora se trata de afinar el proceso, que no es ilimitado. Me parece apropiado describir la dirección que sigue un ensayo en tres fases: fiable, rápido o barato. En general, un ensayo sólo puede tener dos de estas características. Si un ensayo clínico es rápido y barato, es imposible que sea fiable.

No hay fármaco perfecto; ninguno entraña la curación absoluta para nadie sin efectos secundarios. El ensayo clínico sigue siendo una prueba fundamental de cualquier medicina o procedimiento terapéutico nuevos. Una buena manera de evaluar la fiabilidad de los ensayos es compararlos con asuntos que requieran un juicio médico. ¿Se realizan operaciones quirúrgicas innecesarias con frecuencia? ¿Se envían a menudo facturas falsas a las mutuas privadas o a la Seguridad Social? Si se va un poco más lejos, ¿se comprueban a fondo otros productos que adquieren los consumidores y son exactas las reclamaciones publicadas? La validez de las reclamaciones en el campo de la medicina está mucho mejor comprobada que en casi cualquier otra área de las transacciones comerciales.

La profesión médica acepta los ensayos clínicos normalizados y controlados como el requisito indispensable para decidir la eficacia de un tratamiento. La metodología aún está en fase de desarrollo y algunos de los nuevos enfoques de los ensayos tienen que demostrar su eficacia. Un aumento en la cooperación entre los investigadores y la administración sanitaria llevará a mejorar los tratamientos y seguir eliminando los viejos fármacos y procedimientos inútiles. A la larga, disminuirán también las tristes historias de charlatanes que se aprovechaban de la gente en un tiempo en que podían cuidar menos de sí mismos. El proceso del ensayo clínico es el método más objetivo jamás desarrollado para asegurar la eficacia de un tratamiento. Caro y lento, necesitado de constantes precisiones y vigilancia, es, sin embargo, fiable.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TISSUE PLASMINOGEN ACTIVATOR FOR ACUTE ISCHEMIC STROKE. National Institute of Neurological Disorder and Stroke rt-PA Stroke Study Group, en *New England Journal of Medicine*, vol. 333, n.º 24, págs. 1581-1587; 14 de diciembre, 1995.

INTERNATIONAL STROKE TRIAL (IST): A RANDOMIZED TRIAL OF ASPIRIN, SUBCUTANEOUS HEPARIN, BOTH OR NEITHER AMONG 19.435 PATIENTS WITH ACUTE ISCHEMIC STROKE. International Stroke Trial Collaborative Group, en *Lancet*, vol. 349, n.º 9065, págs. 1569-1581; 31 de mayo, 1997.

OVERSIGHT MECHANISMS FOR CLINICAL RESEARCH. Ralph Snydermann y Edward W. Holmes, en *Science*, vol. 287, n.º 5453, págs. 595-597; 28 de enero, 2000.

TELETRANSPORTE CUANTICO

El sueño de la fantasía científica de transportar seres de un lugar a otro sin pasar por los intermedios es ya una realidad, al menos para las partículas de luz

Anton Zeilinger

La escena se repite en las películas y series televisivas de fantasía científica. Aparece un grupo intrépido de exploradores que entran en una cámara especial, se producen unos fogonazos de luz, acompañados de estrépito, y nuestros héroes se difuminan hasta disolverse, para reaparecer en un planeta remoto. En eso sueña el teletransporte, en viajar de un sitio a otro sin tener que pasar por kilómetros intermedios en coche o avión. Aunque el teletransporte de objetos grandes o de seres humanos pertenece aún al reino de lo onírico, el cuántico se ha hecho realidad para los fotones, las partículas de la luz.

El teletransporte cuántico se basa en propiedades fundamentales (y peculiares) de la mecánica cuántica, una rama de la física creada en el primer cuarto del siglo XX para explicar qué ocurre a escala atómica. Desde el principio se advirtió que la teoría cuántica daba pie a todo tipo de fenómenos nuevos, algunos de los cuales desafiaban al sentido común. Gracias al progreso técnico del último cuarto del siglo XX se han acometido experimentos en los que no sólo se han puesto de manifiesto curiosos aspectos básicos de la mecánica cuántica, sino que, como en el caso del teletransporte cuántico, se los ha aplicado también a la consecución de hitos antes inconcebibles.

ANTON ZEILINGER se halla desde 1999 adscrito al Instituto de Física Experimental de Viena, tras pasar nueve años en la Universidad de Innsbruck. Las paradojas de la mecánica cuántica le llevaron al mundo de la física hace casi 40 años.

En novelas y películas los teletransportes suelen ser instantáneos, violando el límite de velocidad impuesto por Albert Einstein, que dedujo de su teoría de la relatividad que nada puede moverse más deprisa que la luz. El teletransporte es, además, un medio menos farragoso que los satélites espaciales.

En casi todas las representaciones fantasiosas encontramos la misma pauta. Un aparato óptico barre el objeto original con el fin de extraer la información necesaria para describirlo, información que el transmisor envía a la estación receptora, donde se obtiene con ella una copia exacta del original. En unos casos el material de que estaba constituido el original se transporta también a la estación receptora, en forma de "energía"; en otros, la copia se crea con átomos y moléculas que había ya en ese destino.

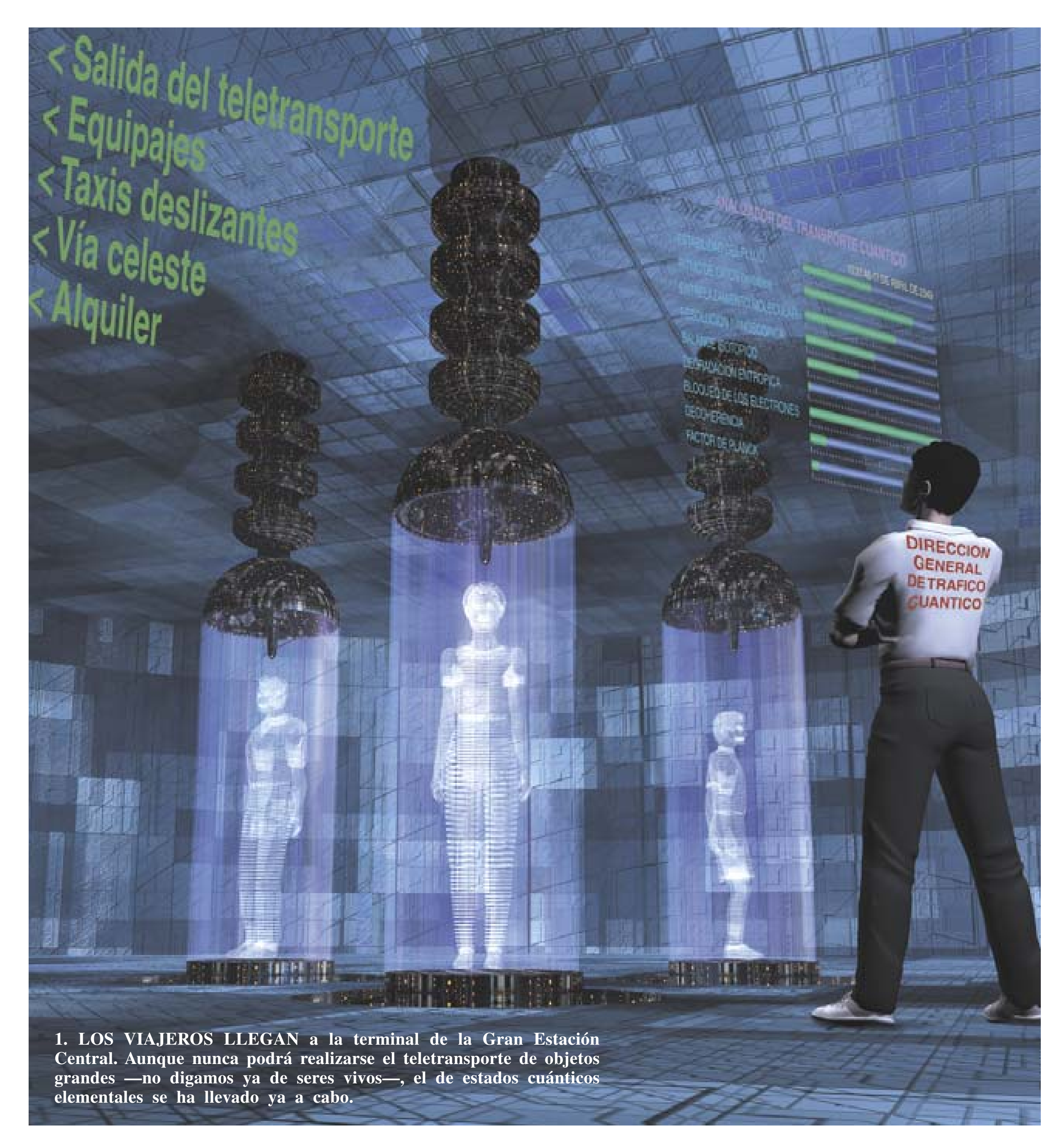
Diríase que la mecánica cuántica impide, por principio, semejante método de transporte. De acuerdo con el principio de incertidumbre de Heisenberg no pueden conocerse a la vez y con absoluta precisión la posición de un objeto y su cantidad de movimiento. No es posible, pues, realizar un barrido perfecto del objeto que se teletransportará; la posición o la velocidad de cada átomo y electrón estarían sujetas a errores. El principio de indeterminación de Heisenberg se aplica también a otros pares de magnitudes y hace que sea imposible medir el estado cuántico exacto total de cualquier objeto con certeza. Sin embargo, esas mediciones serían necesarias para recabar toda la información que requiere la descripción exacta del original.

Un equipo de físicos echó por tierra en 1993 esa idea asentada, tras descubrir la forma de valerse de la mecánica cuántica para efectuar el teletransporte. Hablamos de Charles H. Bennett, de IBM, Gilles Brassard, Claude Crépeau y Richard Josza, de la Universidad de Montreal, Asher Peres, del Instituto de Tecnología de Israel, y William K. Wootters, del Colegio Williams. Observaron que una característica fundamental de la mecánica cuántica, el entrelazamiento, podría utilizarse para obviar las limitaciones impuestas por el principio de incertidumbre de Heisenberg sin violarlo.

El entrelazamiento

Madrid, año 2100. Un amigo al que le gusta tontear con la física y los trucos de magia trae a la fiesta de fin de curso unos cuantos pares de dados. Sugiere a Salvio, el listillo de turno, que tire cada vez un par y cada par sólo una vez. Toma el primero precavidamente; se acuerda del chasco del microagujero negro de las Navidades pasadas. Por fin lo tira y saca una pareja de treses. Tira el siguiente par. Doble 6. El siguiente: dos unos. Siempre coinciden.

Los dados de la historia se portan como si fueran partículas entrelazadas cuánticamente. Cada dado es de por sí aleatorio y carente de sesgo, pero el número que le sale es siempre el mismo que le sale al dado con el que está entrelazado. Se ha conseguido producir este comportamiento

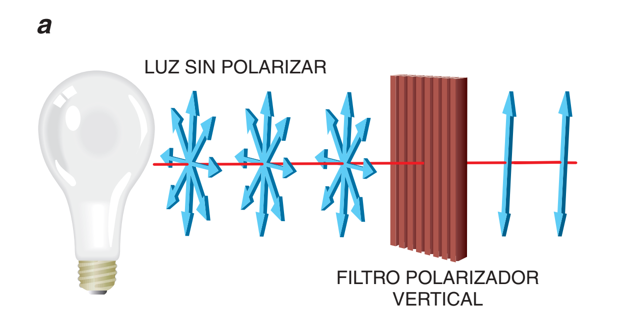


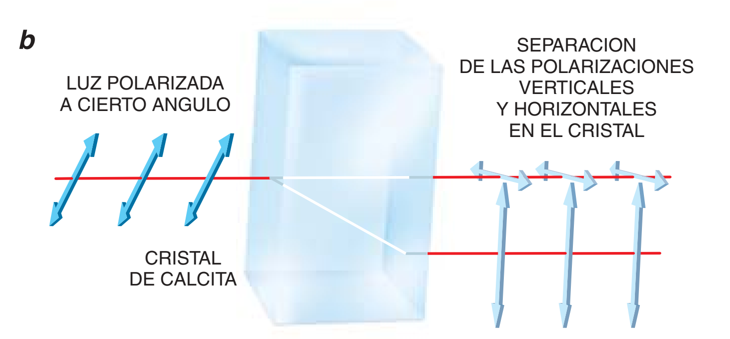
1. LOS VIAJEROS LLEGAN a la terminal de la Gran Estación Central. Aunque nunca podrá realizarse el teletransporte de objetos grandes —no digamos ya de seres vivos—, el de estados cuánticos elementales se ha llevado ya a cabo.

con partículas entrelazadas reales y se lo ha estudiado de un modo exhaustivo. En un experimento típico, el papel de los dados corresponde a pares de átomos, iones o fotones, y el de sus caras a propiedades físicas; la polarización, por ejemplo.

Piénsese en dos fotones cuyas polarizaciones estén entrelazadas de suerte que sean aleatorias e iguales entre sí. Los haces de luz, los fotones sueltos incluso, se hallan constituidos por oscilaciones de los campos electromagnéticos; la polarización es la manera en que se alinean las oscilaciones del campo eléctrico. Supongamos que Alicia tiene uno de los dos fotones entrelazados y Benito el otro. Cuando Alicia mide en su fotón la polarización (horizontal o vertical), la probabilidad de cada uno de los dos resultados posibles es del 50 por ciento. El fotón de Benito tiene las mismas probabilidades, pero el entrelazamiento garantiza que le saldrá exactamente lo mismo que a Alicia. En cuanto a ésta le sale "horizontal", por ejemplo, se sabe que el fotón de Benito está polarizado horizontalmente. Antes de la medición de Alicia ninguno de los dos fotones tiene una polarización propia; el estado entrelazado sólo determina que, cada vez que se efectúe la medición, las dos polarizaciones resultantes serán iguales.

En ese proceso hay un dato llamativo. No importa que Alicia y Benito estén muy lejos una del otro; ocurrirá lo mismo mientras se conserve el entrelazamiento de sus fotones. Aunque Alicia se hallara en Alfa Centauri y Benito en la Tierra, sus resultados





2. LA LUZ SIN POLARIZAR está constituida por fotones polarizados en todas las direcciones (*a*). En la luz polarizada las oscilaciones del campo eléctrico de los fotones (*flechas*) son paralelas. Un cristal de calcita (*b*) divide un haz de luz en dos: manda los fotones cuya polarización es paralela al eje de aquél a un haz y los que la tienen perpendicular, al otro. Los ángulos intermedios entran en una superposición cuántica de ambos haces; cada fotón de este tipo se detectará en un haz o en el otro, con una probabilidad que dependerá del ángulo. Al tratarse de probabilidades, no podemos medir con certeza la polarización desconocida de un solo fotón.

coincidirán cuando los comparen. En cada caso será como si el fotón de Benito estuviese influido mágicamente por la lejana medición de Alicia, y viceversa.

Podemos preguntarnos si la explicación del entrelazamiento no será que cada partícula lleva dentro de sí grabadas unas instrucciones. Quizá cuando entrelazamos las dos partículas, sincronizamos algún mecanismo oculto en ellas que determinará los resultados de la medición de las mismas. Eso justificaría el misterioso efecto de la medición de Alicia en la partícula de Benito. Pero en los años sesenta John Bell demostró un teorema que dice que en ciertas situaciones cualquier explicación por medio de “variables ocultas” del entrelazamiento cuántico tendría que producir resultados diferentes de los predichos por la mecánica cuántica estándar. Los experimentos han confirmado las predicciones de la mecánica cuántica con notabilísima precisión.

Erwin Schrödinger, uno de los progenitores de la mecánica cuántica, decía del entrelazamiento que era la “característica principal” de la física cuántica. Al entrelazamiento se le suele llamar efecto EPR, porque Einstein (E), Boris Podolski (P) y Nathan Rose (R) analizaron en 1935 los efectos que, a una distancia indefinidamente grande, ejercía el entrelazamiento. Einstein la reputaba “una fantasmagórica acción a distancia”. Para explicar los resultados por medio de señales que viajen entre los fotones, tales señales tendrían que moverse más deprisa que la luz. Razón por la cual muchos se han preguntado si el efecto podría usarse para transmitir información a una velocidad mayor que la de la luz.

Por desgracia, la teoría cuántica veda tal posibilidad. Cada medición local de un fotón, tomada en sí misma, arroja un resultado completamente aleatorio y no contiene, pues, información procedente del otro punto remoto. Sólo dice cuáles serán las probabilidades de la medición lejana según lo que allí se mida. No obstante, podemos valernos del entrelazamiento de una forma ingeniosa para conseguir el teletransporte cuántico.

El filón de los fotones entrelazados

Alicia y Benito prevén teletransportar un fotón en el futuro. De entrada, comparten un par entrelazado auxiliar de fotones; Alicia toma el fotón A y Benito el B. En vez de medirlos, cada uno de ellos guarda el suyo sin perturbar el delicado estado entrelazado.

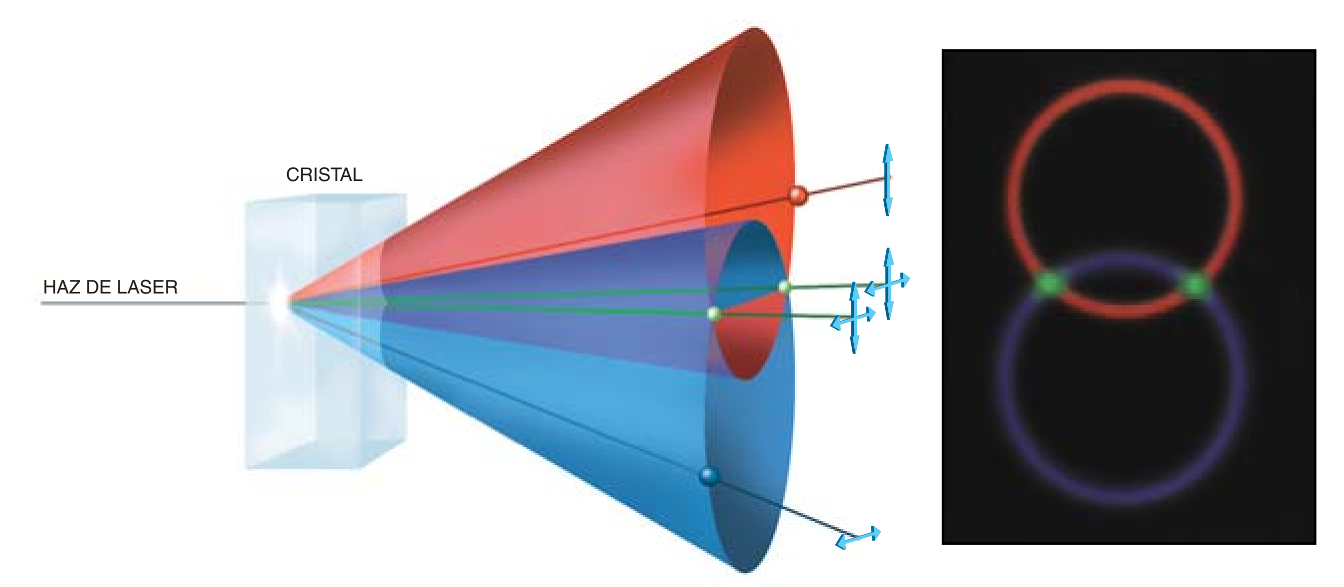
Llegado el momento, Alicia tiene un tercer fotón —llamémoslo X—, que quiere teletransportar a Benito. No sabe cuál es su estado, pero desea que Benito tenga uno con la misma polarización. Descarta medir la polarización de su fotón y enviarle a Benito el resultado. En general,

PREPARADOS PARA EL TELETRANSPORTE CUANTICO...





EL TELETRANSPORTE CUANTICO DE UNA PERSONA (imposible en la práctica, pero un buen ejemplo para la imaginación) empezaría con ella dentro de una cámara de medición (*izquierda*) y junto a una masa igual de material auxiliar (*verde*). La materia auxiliar se ha entrelazado antes cuánticamente con otra análoga, ahora en la lejana estación receptora (*derecha*).



3. SE CREAN PARES DE FOTONES ENTRELAZADOS cuando un haz de láser atraviesa un cristal de borato de bario beta. El cristal convierte de vez en cuando un fotón ultravioleta suelto en dos de menos energía, uno polarizado verticalmente (*sobre el cono rojo*), otro horizontalmente (*sobre el cono azul*). Si estos fotones se mueven por las intersecciones de los conos (*verde*), ni uno ni el otro tendrán una polarización definida, pero las relativas serán complementarias: están entrelazados. La imagen coloreada (*a la derecha*) es una fotografía de la luz tras el cambio de frecuencia. Los colores no representan el color de la luz.

el resultado de su medición no será idéntico al estado original del fotón. Esto es el principio de incertidumbre de Heisenberg en acción.

Para teletransportar el fotón X, Alicia lo mide conjuntamente con el fotón A, sin determinar sus polarizaciones individuales. Puede que le salga, por ejemplo, que sus polarizaciones son "perpendiculares" entre sí (pero seguirá sin conocer las polarizaciones absolutas de ninguno de los dos). En puridad técnica, de la medición conjunta de los fotones A y X se dice que es una "medición del estado de Bell". La medición de Alicia produce un efecto sutil: que cambie el fotón de Benito y se correlacione con una combinación del resultado de esa medición de Alicia y del estado que el fotón X tenía originalmente. El fotón de Benito contiene ahora el estado del fotón X de Alicia, exactamente o modificado de manera sencilla.

Para completar el teletransporte, Alicia debe enviar un mensaje a Benito por medios ordinarios (una llamada de teléfono, una nota en un pedazo de papel). Después de recibir este mensaje, Benito puede, si es necesario, transformar su fotón B, y el resultado final será que se convierta en una copia exacta del fotón original X. La transformación que deberá aplicar Benito dependerá del resultado de la medición de Alicia. Hay cuatro posibilidades, correspondientes a cuatro relaciones cuánticas entre los fotones A y X de Alicia. Una transformación típica que Benito habrá de aplicar a su fotón será girar su polarización 90 grados; podrá hacerlo enviándolo a través de un cristal con las propiedades ópticas adecuadas.

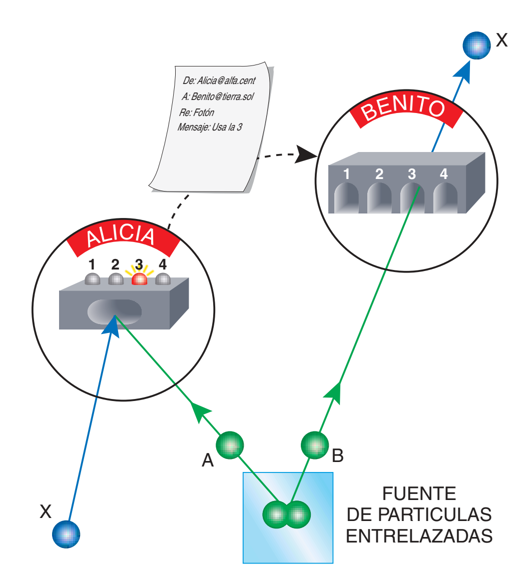
Es completamente aleatorio e independiente del estado original del fotón X cuál de los cuatro resultados posibles obtendrá Alicia. Benito no sabrá, pues, cómo habrá de procesar su fotón hasta que no conozca el resultado de la medición de Alicia.

...UNA MEDICION CUANTICA...





LA MEDICION CONJUNTA efectuada en la materia auxiliar y la persona (*a la izquierda*) las transforma en un estado cuántico aleatorio y produce una gran cantidad de datos aleatorios, aunque importantes (dos bits por estado elemental). Por medio de una " fantasmagórica acción a distancia" la medición cambia también instantáneamente el estado cuántico de la materia análoga remota (*derecha*).



4. EL TELETRANSPORTE CUANTICO IDEAL requiere que Alicia, la emisora, y Benito, el receptor, compartan un par de partículas entrelazadas, A y B (*verde*). Alicia tiene, además, una partícula en un estado cuántico desconocido X (*azul*). Mide el estado de Bell de las partículas A y X, y le sale uno de los cuatro resultados posibles, que comunica a Benito por medios ordinarios. Según cuál sea el resultado de Alicia, Benito no modificará su partícula (1) o la girará (2, 3, 4). De una forma o de la otra obtiene una copia perfecta de la partícula original X.

Puede decirse que el fotón de Benito contiene instantáneamente toda la información del original de Alicia, transportada hasta él por mecánica cuántica. Mas para saber cómo ha de leerla Benito ha de esperar a que le llegue una información clásica, dos bits que no podrán viajar más deprisa que la luz.

Los escépticos quizá protesten diciendo que lo único que se teletransporta es la polarización del fotón o, más en general, su estado cuántico, no el fotón "mismo". Ahora bien, como el estado cuántico es su característica definitoria, teletransportarlo equivale completamente a teletransportar la partícula.

Obsérvese que, tras el teletransporte cuántico, no hay dos copias idénticas del fotón X. La información clásica puede copiarse tantas veces cuantas se quiera, pero la copia perfecta de la cuántica es imposible, como dicta el teorema de no clonación demostrado por Wooters y Wojciech Zurek en 1982. (Si pudiésemos clonar un estado cuántico, usaríamos los clones para violar el principio de Heisenberg.) La medición de Alicia entrelaza realmente su fotón A con el X, y el fotón X pierde toda memoria, podría decirse, de su estado original. En su calidad de miembro de un par entrelazado carece de estado de polarización propio. El estado original de X desaparece, pues, del entorno de Alicia.

Cómo eludir a Heisenberg

El estado del fotón X ha sido transferido a Benito, además, sin que ni él ni Alicia sepan cuál es. El resultado de la medición de Alicia, enteramente aleatorio, no aclara nada sobre el estado en cuestión. Así es como elude este procedimiento el principio de Heisenberg, que nos impide determinar el estado cuántico cabal de una partícula, ¡pero no teletransportar el estado completo mientras no intentemos ver cuál es!

Por tanto, la información cuántica teletransportada no viaja materialmente de Alicia a Benito. Lo único que viaja materialmente es el mensaje, que le comunica a Benito el resultado de la medición de Alicia y, por ende, cómo procesar su fotón, pero sin información alguna del estado mismo del fotón X.

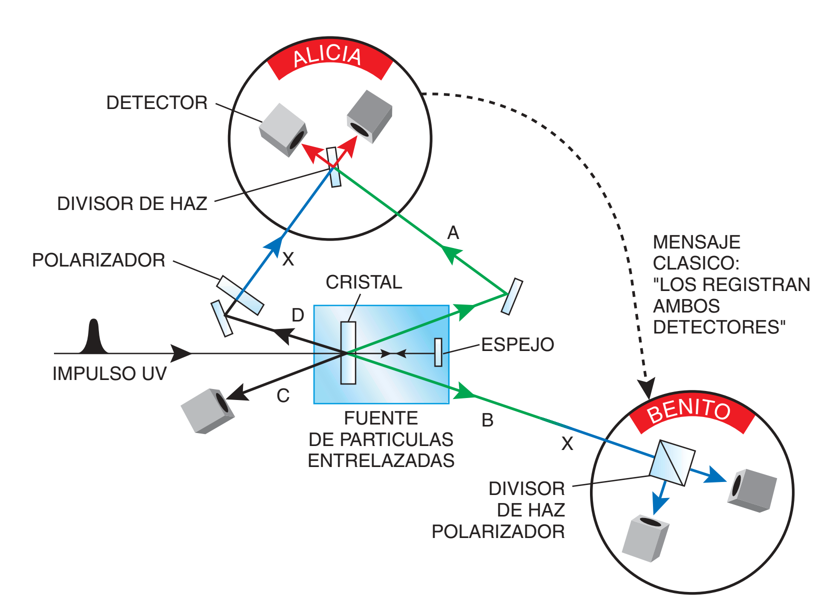
En uno de los cuatro casos Alicia tiene suerte con su medición; el fotón de Benito se convierte inmediatamente en una copia idéntica del original de Alicia. Podría dar la impresión de que la información ha viajado instantáneamente de Alicia a Benito, traspasando el límite de velocidad de Einstein. Sin embargo, esta extraña característica no vale para transmitir información, porque Benito no puede saber que su fotón es ya una copia idéntica. Sólo cuando se entera de cuál fue el resultado de la medición del estado de Bell realizada por Alicia, que se la ha transmitido por medios clásicos, puede aprovechar la información contenida en el estado cuántico teletransportado. Supongamos que intenta adivinar en qué casos el teletransporte ha tenido éxito instantáneamente. Se equivocará el 75 por ciento de las veces, y no sabrá cuándo ha acertado. Si emplea los fotones conforme a su intuición, los resultados serían los mismos que si hubiese tomado un haz de fotones con polarizaciones aleatorias. La relatividad de Einstein prevalece, pues; hasta la fantasmagórica acción a distancia instantánea de la mecánica cuántica es incapaz de enviar a una velocidad mayor que la de la luz una información aprovechable.

...TRANSMISION DE DATOS ALEATORIOS...





LOS DATOS MEDIDOS deben enviarse a la estación receptora por medios corrientes, que no pueden superar la velocidad de la luz. No se puede teletransportar, pues, a una persona a una velocidad mayor que la de la luz.



5. EL EXPERIMENTO DE INNSBRUCK empieza con un impulso breve de luz de láser ultravioleta, que atraviesa de izquierda a derecha un cristal, donde produce el par entrelazado de fotones A y B, que van a parar a Alicia y Benito, respectivamente. El impulso se refleja y vuelve a atravesar el cristal; crea dos fotones más, C y D. Un polarizador prepara el fotón D en un estado determinado, X. Se detecta el fotón C, lo que confirma que se ha enviado a Alicia el fotón X. Alicia combina los fotones A y X con un divisor de haz (*véase la figura 6*). Si detecta un fotón en cada detector (lo que acontece como mucho el 25 por ciento de las veces) se lo notifica a Benito, que usa un divisor de haz polarizador para verificar que su fotón ha adquirido la polarización X y que, por tanto, el teletransporte ha tenido éxito.

Puede dar la impresión de que la propuesta teórica que se ha expuesto mostraba los planos para la construcción de un teletransportador. Nada más lejos de la verdad. Las dificultades experimentales eran grandes. A lo largo de los últimos diez años la producción de pares entrelazados de fotones en el laboratorio se ha convertido en una rutina, pero no se había medido antes el estado de Bell de dos fotones independientes.

Construcción de un teletransportador

Una potente forma de producir pares de fotones entrelazados es el cambio paramétrico de frecuencia espontáneo: un solo fotón que atraviesa un cristal especial genera a veces dos fotones nuevos, entrelazados de manera que cuando se los mide exhiben polarizaciones opuestas.

Harto mayor dificultad reviste entrelazar dos fotones independientes que ya existen, tal y como ha de ocurrir durante el funcionamiento de un analizador del estado de Bell. Ello significa que los dos fotones (A y X) han de perder, de una forma u otra, sus características individuales. En 1997 mi grupo (Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl y Harald Weinfurter), por entonces en la Universidad de Innsbruck, aplicó una solución de este problema.

En nuestro experimento de teletransporte, un breve impulso de luz ultravioleta atraviesa un cristal y crea los fotones entrelazados A y B. Uno va a parar a Alicia, el otro a Benito. Un espejo refleja el impulso ultravioleta, de suerte que atraviese de nuevo, de vuelta, el cristal, donde podrá crear otro par de fotones C y D. (Que también estarán entrelazados, pero no nos valdremos de ello para nada.) El fotón C acaba en un detector, que nos avisa de que su compañero D está disponible para el teletransporte. El fotón D pasa por un polarizador, que puede orientarse de cualquier forma concebible. El fotón polarizado resultante es nuestro fotón X, el que se va a teletransportar, y sigue su viaje hasta Alicia. En cuanto pasa por el polarizador, X deja de estar entrelazado para devenir un fotón independiente. Y aunque *nosotros* sabemos cuál es su polarización porque hemos sido los que preparamos el polarizador, Alicia no lo sabe. Volvemos a utilizar de idéntico modo el mismo impulso ultravioleta para garantizar que Alicia tendrá al mismo tiempo los fotones A y X.

...RECONSTRUCCION DEL VIAJERO





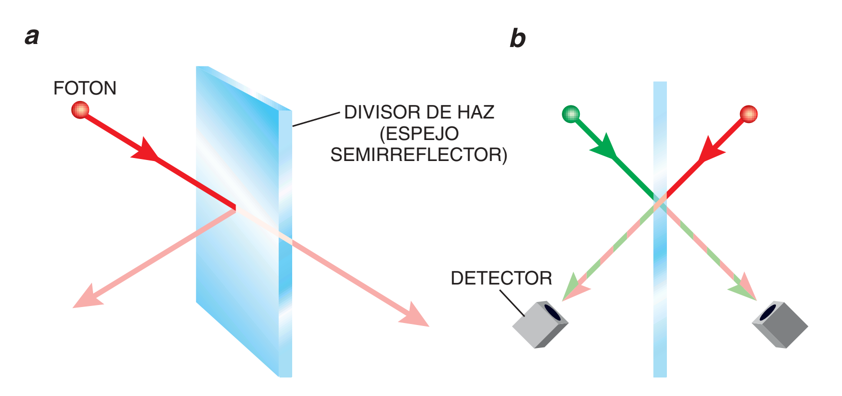
EL RECEPTOR CREA DE NUEVO AL VIAJERO, reproduciendo con exactitud el estado cuántico de cada átomo y molécula, ajustando el estado de la materia como digan los datos aleatorios de la medición enviados desde la estación lectora.

Procede ahora medir el estado de Bell. Para ello, Alicia combina sus dos fotones (A y X) por medio de un espejo semirreflector, un aparato que refleja la mitad de la luz incidente. La probabilidad de que un fotón suelto lo atraviese o se refleje en él es de mitad y mitad. Desde un punto de vista cuántico, el fotón entra en una superposición de esas dos posibilidades.

Supongamos que los dos fotones dan en lados opuestos del espejo, alineadas sus trayectorias de forma que el camino de un fotón reflejado en un lado coincida con el de uno transmitido al otro, y viceversa. Un detector espera al final de cada trayectoria. Por norma los dos fotones se reflejarán independientemente y habrá una probabilidad del 50 por ciento de que acaben en detectores distintos. Pero si los fotones son indistinguibles y llegan al espejo en el mismo instante, habrá una interferencia: se anularán ciertas posibilidades y no se producirán, en tanto que otras se reforzarán y se producirán más a menudo. Cuando los fotones interfieren, sólo hay una probabilidad de un 25 por ciento de que terminen en detectores distintos. Además, cuando acaban en detectores distintos, equivale a detectar uno de los cuatro posibles estados de Bell de los dos fotones, ése en que Alicia, decíamos, tenía "suerte". El 75 por ciento restante del tiempo los dos fotones terminan en un mismo detector, lo que corresponde a los otros tres estados de Bell, si bien no discrimina entre ellos.

Cuando Alicia detecta simultáneamente un fotón en cada detector, el de Benito se convierte al instante en una copia del fotón original de Alicia, X. Verificamos que este teletransporte se produjo comprobando que el fotón de Benito tenía la polarización que le impusimos al fotón X. Nuestro experimento no era perfecto, pero la polarización correcta se detectó el 80 por ciento de las veces (con fotones aleatorios habría sido un 50). Efectuamos el procedimiento con diversas polarizaciones: vertical, horizontal, lineal a 45 grados e incluso con un tipo no lineal de polarización, la polarización circular.

El aspecto más difícil de nuestro analizador de Bell es hacer fotones A y X indistinguibles. Incluso que llegasen en instantes distintos permitiría identificar qué fotón era cada uno; de ahí la importancia de que se "borrase" la información temporal que las partículas portaban. En



6. EL DIVISOR DE HACES, o espejo semirreflector (*a*), refleja la mitad de la luz que incide en él y transmite la otra mitad. Cada fotón tiene una probabilidad de mitad y mitad de reflejarse o transmitirse. Si dos fotones idénticos inciden en el divisor de haz al mismo tiempo, uno por cada cara (*b*), las partes reflejada y transmitida interferirán y los fotones perderán sus identidades individuales. Detectaremos un fotón en ambos detectores el 25 por ciento de las veces, y será entonces imposible decir si ambos fotones se reflejaron o se transmitieron. Sólo se mide la propiedad relativa: que han ido a detectores diferentes.

nuestro experimento nos valimos de un truco inteligente, sugerido por Marek Zukowski, de la Universidad de Gdansk: hicimos que los fotones pasasen por unos filtros de longitudes de ondas muy estrechos, porque así su longitud de onda se volvía muy precisa y, por tanto, conforme a la relación de incertidumbre de Heisenberg, los fotones se difuminaban en el tiempo.

Un caso mareante es el que se da cuando el fotón teletransportado mismo se entrelaza con otro y carece, pues, de una polarización individual propia. Mi grupo de Innsbruck produjo en 1998 este orden de cosas dándole a Alicia el fotón D sin polarizarlo, con lo que seguía entrelazado con el C. Mostramos que, cuando el teletransporte tenía éxito, el fotón B de Benito acababa entrelazado con el C. El *entrelazamiento* con C, pues, se había transmitido de A a B.

A hombros

Quedó claro que en nuestro experimento hubo teletransporte, pero el porcentaje de éxitos fue bajo. Puesto que nada más podíamos identificar uno de los estados de Bell, sólo podíamos teletransportar el fotón de Alicia un 25 % de las veces, el porcentaje en que aparecía ese estado. No existe ningún analizador del estado de Bell completo para fotones independientes ni para cualquier par de partículas cuánticas creadas de forma independiente; así que por ahora no hay una forma comprobada en el laboratorio de mejorar el rendimiento de nuestro experimento hasta el ciento por ciento.

Sandu Popescu presentó en 1994 —estaba por entonces en la Universidad de Cambridge— una manera de librarse de este problema. Sugirió que el estado que se teletransportase consistiese en un estado cuántico que fuera "a hombros" del fotón auxiliar de Alicia, A. El grupo de Francesco De Martini en la Universidad de Roma 1 "La Sapienza" hizo con éxito una demostración de este procedimiento en 1997. El par de fotones auxiliares estaba entrelazado según cuáles fueran las localizaciones de los fotones: el fotón A se dividía, como con un divisor de haces, y enviaba a dos partes diferentes del aparato de Alicia, ligadas por el entrelazamiento, las dos alternativas a una división similar del fotón B de Benito. El fotón A de Alicia contenía también el estado que había que teletransportar (su estado de polarización). Con los dos papeles desempeñados por un solo fotón, la detección de los cuatro estados de Bell posibles se convierte en una medición ordinaria con una sola partícula: detectar el fotón de Alicia en una de dos localizaciones posibles con una de dos polarizaciones posibles. El inconveniente de este procedimiento estriba en que si a Alicia se le diese un estado desconocido aparte X, para que lo teletransportase tendría que transferirlo a la polarización de su fotón A, algo que en la práctica nadie sabe hacer.

La polarización de un fotón, la característica empleada en los experimentos de Innsbruck y Roma, es una magnitud discreta; cualquier estado de polarización puede expresarse como la superposición de dos estados discretos, por ejemplo la

polarización vertical y la horizontal. El campo electromagnético asociado a la luz presenta también características continuas que equivalen a superposiciones de un número infinito de estados básicos. Así, un haz de luz puede "comprimirse", lo que significa que una de sus propiedades se hace sumamente precisa, o libre de ruido, a expensas de una mayor aleatoriedad de otra propiedad (a la manera de Heisenberg). En 1998 el grupo de Jeffrey Kimble, del Instituto de Tecnología de California, teletransportó un estado comprimido de un haz de luz a otro, con lo que quedó demostrado el teletransporte de un rasgo continuo.

Por notables que sean los experimentos descritos, se hallan muy lejos del teletransporte cuántico de objetos grandes. Nos enfrentamos ante dos problemas imponentes: se requiere, en primer lugar, un par entrelazado de objetos del mismo tipo; segundo, el objeto que se teletransporte y los pares entrelazados deben estar suficientemente aislados del entorno. Si se filtra la menor información al entorno, o desde éste, por medio de interacciones descontroladas, los estados cuánticos de los objetos se degradarán; a este proceso se le llama "decoherencia". Cuesta imaginar cómo podríamos lograr un aislamiento tan extremo para un componente grande del instrumental, no digamos ya para una criatura viva que respira y radia calor. Pero, ¿quién se atreve a adivinar lo que nos depara el futuro?

Podríamos usar las técnicas existentes para teletransportar estados elementales, como los de los fotones de nuestro experimento, a través de distancias de unos kilómetros y puede que hasta a un satélite. Disponemos ya de los recursos técnicos para teletransportar estados de átomos sueltos; sin ir más lejos, el grupo dirigido por Serge Haroche, de la Escuela Normal Superior de París, ha realizado un entrelazamiento de átomos. Parece razonable esperar que, de aquí a diez años, se logre el entrelazamiento de moléculas y su subsiguiente teletransporte. Lo que venga luego, nadie lo sabe.

Más plausible se ve la aplicación del teletransporte a la computación cuántica, donde el concepto común de bits (ceros y unos) se generaliza y convierte en el de qubits, que pueden existir como superposiciones y entrelazamientos de ceros y unos. Podría emplearse el teletransporte para transferir información cuántica entre procesadores cuánticos. Los teletrans-

EL RINCON DEL ESCEPTICO

PREGUNTAS FRECUENTES SOBRE EL TELETRANSPORTE

¿No es exagerado llamarlo teletransporte? Al fin y al cabo, sólo se teletransporta un estado cuántico, no un objeto físico. Esta pregunta suscita otra de mayor calado filosófico: ¿qué entender por identidad? ¿Cómo sabemos que un objeto —el coche, por ejemplo, que encontramos en el garaje por la mañana— es el mismo que vimos hace un rato? Cuando tiene todas las propiedades correctas. La física cuántica respalda esa idea: las partículas del mismo tipo que se hallan en el mismo estado cuántico son indistinguibles incluso por principio. Si se pudiesen cambiar meticulosamente todos los átomos de hierro del coche por los de una veta del mineral y reproducir en éstos con exactitud los estados de aquéllos, el resultado final sería idéntico, al más profundo nivel, al coche original. La identidad sólo puede significar eso: ser lo mismo en cada propiedad.

¿No resulta acaso una suerte de "fax cuántico"? Al mandar un fax se produce una copia, diferente a ojos vista, del original, mientras que un objeto teletransportado es indistinguible por principio. Además, el teletransporte cuántico exige destruir el original.

¿Podemos esperar que se logre el teletransporte de objetos complicados? Los obstáculos son muchos e imponentes. De entrada, el objeto ha de encontrarse en un estado cuántico puro; esos estados son muy frágiles. Los fotones no interaccionan apenas con el aire, así que nuestros experimentos pueden hacerse sin aislamientos, pero los experimentos con átomos y objetos mayores deben realizarse en un vacío para evitar colisiones con las moléculas gaseosas. Además, cuanto mayor sea un objeto, más fácil será perturbar su estado cuántico. Un pedazo diminuto de materia puede ser perturbado incluso por la radiación térmica de las paredes del aparato. Por eso no suelen verse efectos cuánticos a nuestro alrededor.

Se han llevado a cabo interferencias cuánticas, un efecto más fácil de producir que el entrelazamiento o el teletransporte, con buckybolas, esferas que constan de 60 átomos de carbono. Tales experimentos se extenderán a objetos mayores, hasta virus pequeños quizá.

Otro problema es la medición del estado de Bell. Decir que se ha hecho una medición del estado de Bell con un virus que conste de 10^7 átomos, ¿qué significado tendría? ¿Cómo extraeríamos los 10^8 bits de información que una medición así generaría? Con un objeto de sólo unos gramos los números serían imposibles: 10^{24} bits de datos.

¿Requeriría precisión cuántica el teletransportar una persona? Hallarse en el mismo estado cuántico no parece necesario para ser la misma persona. Cambiamos nuestros estados constantemente y seguimos siendo la misma persona. Pero ni los gemelos univitelinos, o clones biológicos, son "la misma persona", pues tienen memorias diferentes. ¿Nos impide la incertidumbre de Heisenberg duplicar una persona con la suficiente precisión para que piense que es la misma persona que la original? Quién sabe. Llama, no obstante, la atención que el teorema de no clonación cuántica nos prohíba hacer una copia exacta de una persona.





Si teletransportamos el cuerpo de una persona, ¿nos dejaremos atrás su mente?

LAS AVENTURAS CUANTICAS DE ALICIA & BENITO



La intrépida exploradora Alicia descubre cristales estables de einstenio. También su rival, la malvada Zelda, los "descubre". Pero Alicia y su compañero Benito (en la Tierra) tienen una ventaja: ORDENADORES Y TELETRANSPORTADORES CUANTICOS. Alicia hace unos procesos de datos cuánticos ...



... y teletransporta el resultado —"qubits" de datos— a Benito. Tienen mucha suerte: ¡el teletransporte sale a pedir de boca!



Alicia manda un mensaje a Benito por medio de un haz de láser que le dice que sus qubits tienen los datos correctos. Zelda informa de los cristales a su compañero, Yuri, por medio de un láser también.



Antes de que el haz de láser llegue a la Tierra, Benito introduce sus qubits en una simulación cuántica de la economía.

4 AÑOS DESPUES



¡Benito recibe el mensaje de Alicia que le hace saber que sus qubits eran copias fieles de los de ella!



Yuri recibe el mensaje de Zelda, pero sólo entonces puede comenzar su simulación cuántica.



Benito invierte los ahorrillos que tenían Alicia y él en futuros de einstenio antes que nadie. Su éxito dependió de la suerte, una oportunidad de cuatro por qubit ...



... pero basta tener suerte una vez para pegar un pelotazo. Yuri y Zelda se pasaron al nada cuántico ramo del servicio doméstico. FIN

portadores cuánticos podrían servir, además, para construir un computador cuántico. La historieta adjunta de "las aventuras de Alicia y Benito en Alfa Centauri" ilustra una situación cautivadora, en la que una combinación de teletransporte y computación cuántica podría reportar una ventaja. Como si la información cuántica se recibiese instantáneamente, sin tener que esperar su llegada por medios normales.

La mecánica cuántica es una de las teorías más profundas jamás descubiertas. Los problemas que plantea a nuestra percepción intuitiva del mundo llevaron a Einstein a criticarla con energía. Para él, la física debía constituir una tarea de comprensión de la realidad objetiva, independiente del observador. Lo que no le impidió percatarse de que nos enfrentábamos ante grandes problemas al querer asignar esa realidad física independiente a cada miembro de un par entrelazado. Su antagonista, Niels Bohr, le replicó que había que tomar en cuenta el sistema entero: en el caso de un par entrelazado, la disposición conjunta de ambas partículas. El desiderátum de Einstein, el estado real independiente de cada partícula, carece de significado para un sistema cuántico entrelazado.

El teletransporte cuántico desciende directamente de las situaciones estudiadas por Einstein y Bohr. Al analizar el experimento nos encontraremos con todo tipo de problemas si nos preguntamos cuáles son *realmente* las propiedades de las partículas individuales cuando están entrelazadas. Hemos de analizar con cuidado qué significa "tener" una polarización. No podemos escapar de la conclusión de que sólo podemos hablar de ciertos resultados experimentales, obtenidos gracias a unas mediciones. En la nuestra de la polarización, un chasquido en el detector nos permite hacernos la idea de que el fotón "tenía" realmente cierta polarización en el momento de la medición. Pero no perdamos de vista que ésa es una forma de decir lo que pasa engañosa. Será válida en la hipótesis exclusiva de que nos refiramos a ese experimento en concreto.

Siguiendo a Bohr, entenderemos la mecánica cuántica si advertimos que la ciencia no describe cómo *es* la naturaleza, sino que expresa lo que podemos *decir* de ésta. En ello reside el verdadero valor de los experimentos, como el teletransporte, que investigan los fundamentos de la mecánica cuántica; a saber, en que nos ayudan a tener un conocimiento más profundo del misterioso mundo cuántico.

COMPUTADORES CUANTICOS

Quizá la aplicación más realista del teletransporte cuántico, a extramuros de la investigación física, sea en el campo de la computación cuántica. Un computador digital ordinario utiliza bits, que toman valores, 0 o 1, definidos, mientras que uno cuántico emplea bits cuánticos, qubits. Los qubits pueden estar en superposiciones cuánticas de 0 y 1, lo mismo que un fotón puede estar en superposiciones de la polarización horizontal y la vertical. En realidad, al enviar un solo fotón el teletransportador cuántico básico transmite un qubit de información cuántica.

Puede parecer rara una superposición de números, pero como decía Rolf Landauer, "cuando de chicos aprendimos a contar con los dedos extendidos, cuerpos clásicos, ni habíamos oído hablar de la mecánica cuántica y la superposición. La idea intuitiva que adquirimos erraba. Creíamos que la información era clásica. Creíamos que levantábamos tres dedos, luego cuatro. No sabíamos que podía haber una superposición de levantar tres y levantar cuatro".

Un computador cuántico puede funcionar como una superposición de muchos datos de entrada a la vez. Puede, por ejemplo, ejecutar un algoritmo simultáneamente sobre un millón de datos de entrada utilizando sólo tantos qubits como bits necesitaría un computador ordinario para ejecutar el algoritmo una sola vez sobre un solo dato de entrada. Los algoritmos que se ejecutan con computadores cuánticos pueden resolver ciertos problemas más deprisa (con menos pasos de computación) que cualquier algoritmo conocido ejecutado en un ordenador clásico. Entre esos problemas están el de encontrar un determinado elemento de una base de datos y el obtener la factorización de números grandes, de sumo interés en el desciframiento de códigos secretos.



Por ahora sólo se han construido los elementos más fundamentales de los computadores cuánticos: puertas lógicas que procesan uno o dos qubits. La construcción, siquiera sea a pequeña escala, de un computador cuántico queda aún lejos. Habrá que resolver el problema de la transferencia fiable de los datos cuánticos entre los diferentes procesadores o puertas lógicas, sea dentro de un solo computador o a través de redes cuánticas. La llave de la solución podría esconderse en el teletransporte cuántico.

Daniel Gottesman, de Microsoft, e Isaac L. Chuang, de IBM, han demostrado hace poco que se puede construir un computador cuántico polivalente con tres componentes básicos: partículas entrelazadas, teletransportadores cuánticos y puertas que manejen un solo qubit por vez. Este resultado ofrece un método sistemático de construir puertas de dos qubits. El truco para construir una puerta de dos qubits con un teletransportador consiste en teletransportar dos qubits desde lo que entra en la puerta hasta lo que sale, por medio de pares entrelazados modificados de una manera muy determinada. Los pares entrelazados se modifican de suerte tal, que la salida de la puerta reciba los qubits adecuadamente procesados. La ejecución de la lógica cuántica en dos qubits desconocidos se reduce, pues, a preparar unos estados entrelazados predefinidos concretos y teletransportarlos. Cierto es que la medición completa de un estado de Bell, necesaria para teletransportar con éxito total es en sí misma una forma de procesamiento de dos qubits.

—A. Z.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUANTUM INFORMATION AND COMPUTATION. Charles H. Bennett, en *Physics Today*, vol. 48, núm. 10, págs. 24-31, octubre de 1995.

EXPERIMENTAL QUANTUM TELEPORTATION. D. Bouwmeester, J. W. Pan. K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter y A. Zeilinger, en *Nature*, vol. 390, págs. 575-579, 11 de diciembre de 1997.

QUANTUM INFORMATION. Número especial de *Physics World*, volumen 11, número 3, marzo de 1998.

QUANTUM THEORY: WEIRD AND WONDERFUL. A. J. Leggett, en *Physics World*, vol. 12, núm. 12, págs. 73-77, diciembre de 1999.

Vigilancia de los signos vitales de la Tierra

Un nuevo satélite de la NASA, perteneciente a la flota del Sistema de Observación de la Tierra, utiliza cinco modernísimos sensores para diagnosticar el estado de salud del planeta

Michael D. King y David D. Herring

A 705 kilómetros del suelo, el satélite Terra examina minuciosamente la salud de nuestro planeta. Todo influye en el clima, desde las nubes y las plantas hasta la luz solar, pasando por la temperatura, el fuego y el hielo. Terra recoge estas informaciones día tras día por el globo entero. El satélite, no mayor que un autobús, orbita la Tierra de polo a polo y transporta instrumentos muy sensibles que detectan los signos vitales del planeta a medida que avista cada región.

Ciertos cambios ambientales se están produciendo hoy a un ritmo inédito en nuestra historia reciente. Imaginemos, por ejemplo, los centenares de incendios forestales que se provocan cada año para ganar tierra de labor, práctica cuadruplicada desde hace un siglo. Cada año se quema una media de 142.000 kilómetros cuadrados de bosque tropical. Algunos de los sensores del satélite Terra pueden seguir las llamas y calibrar su intensidad, mientras que otros miden la extensión arrasada por el fuego y observan la trayectoria atmosférica de las partículas de humo y los gases. Uno de estos sensores distingue cambios con resolución de 15 metros, lo que permite detectar puntos en los que los rescoldos humeantes pueden de nuevo alimentar llamas.

Terra es el buque insignia del Sistema de Observación de la Tierra (EOS), un programa de satélites de la NASA que permitirá descifrar el clima terrestre con la precisión suficiente para predecir cambios futuros, misión que exige una extrema habilidad para distinguir los ciclos naturales de los cambios antropogénicos. Las fuerzas geológicas de la naturaleza —erupciones volcánicas, variaciones en las corrientes oceánicas y ciclos de glaciaciones— vienen alterando la superficie y el clima de nuestro planeta desde que se formó hace 4500 millones de años. Pero innegables pruebas científicas revelan que las actividades humanas están hoy acelerando el ritmo de cambio mundial e incluso han adquirido una magnitud comparable a una fuerza geológica.

Es preciso efectuar gran número de mediciones por todo el mundo, durante un largo período, con el fin de aportar informaciones correctas a las simulaciones informáticas que nos permitan predecir el cambio climático. Con tal propósito identificamos 24 factores que se combinan para desempeñar un papel primordial en la determinación del clima. En esos factores se incluyen el flujo de luz solar y otras energías radiantes, la concentración de gases del efecto invernadero, las áreas cubiertas de nieve y hielo, las nubes y aerosoles, así como los cambios en la vegetación y otras características de la superficie terrestre. La misión de Terra consiste en medir 16 de esas 24 características.

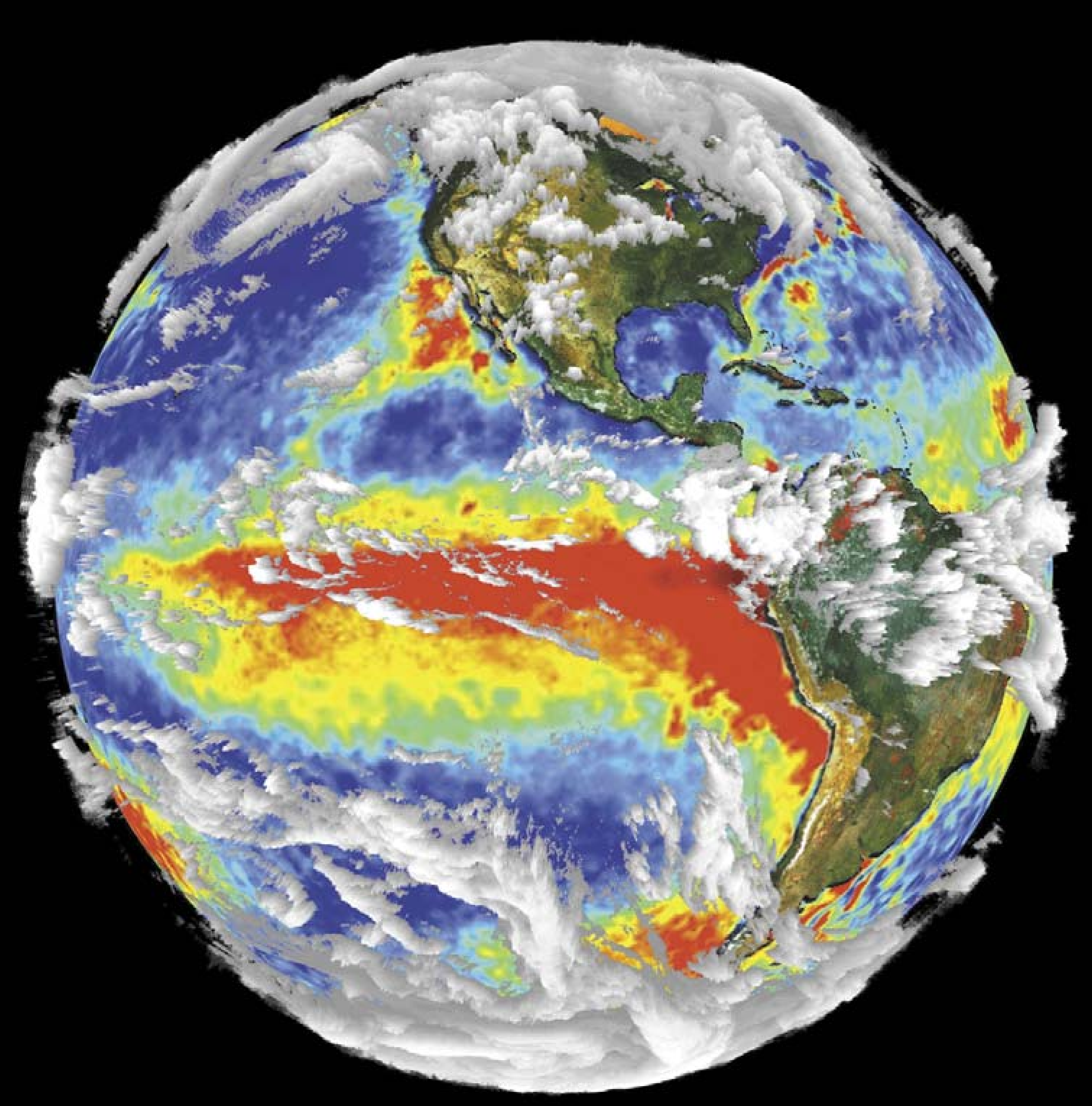
En 1988, la Comisión de Ciencias del Sistema Tierra de la NASA publicó un informe que reclamaba una estrategia a largo plazo para la medición de los signos vitales del planeta. Insistía la comisión en que la única manera viable de vigilar tales signos durante largo tiempo era utilizar sensores a bordo de satélites que "vieran" la Tierra desde el espacio. En consecuencia, la NASA creó en 1991 el Sistema de Observación de la Tierra, y desde entonces el Congreso de los Estados Unidos ha asignado el equivalente a 1,3 billones de pesetas al diseño y ejecución de ese programa hasta octubre de 2001. Nuestro equipo ha dedicado 225.000 millones de pesetas a la construcción y lanzamiento de Terra, el benjamín de la flota EOS.

Una nueva generación de sensores remotos

Terra entró en órbita el 18 de diciembre de 1999. Desde el Centro Goddard de Vuelos Espaciales se controla su trayectoria de vuelo y los sensores incorporados. Estos sensores no son exploradores activos como los instrumentos que emiten haces de láser o de radar y acusan su reflexión en la superficie terrestre, sino enteramente pasivos, parecidos a una cámara digital.

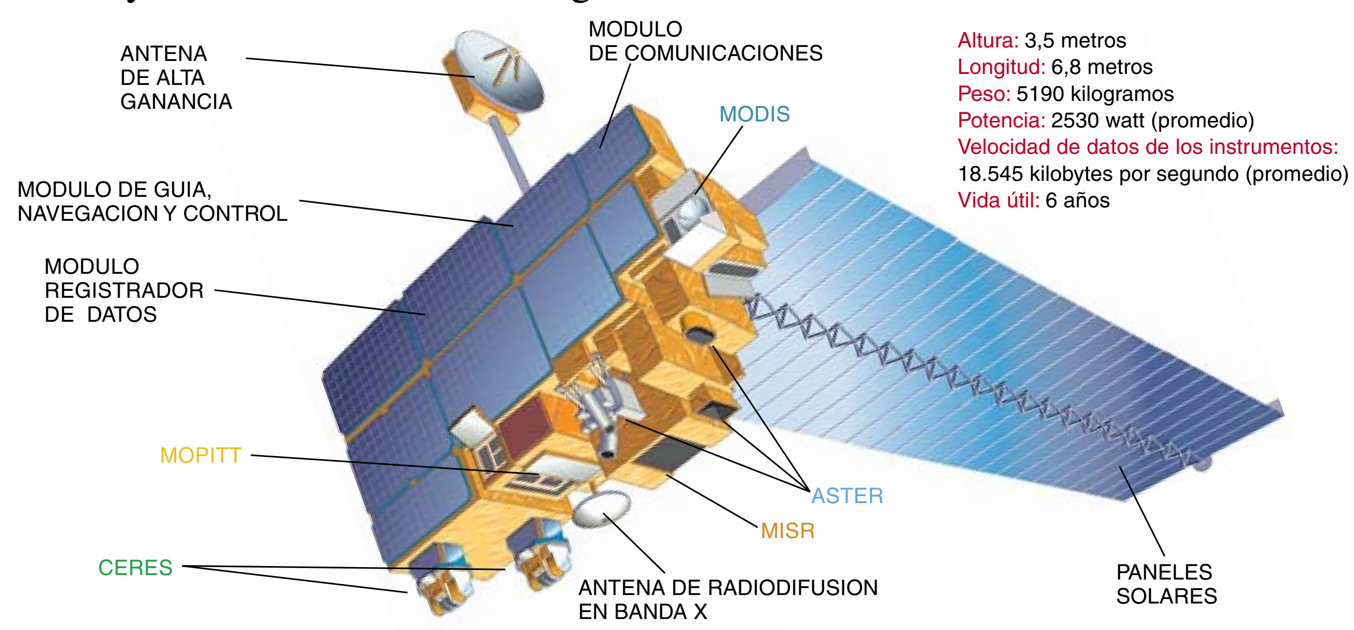
De la atmósfera terrestre escapan paquetes de energía —luz solar y luz de infrarrojos— que atraviesan las aberturas de los sensores. Esos paquetes inciden en detectores especialmente sensibilizados a la energía electromagnética de determinadas longitudes de onda. Igual que sintonizamos distintas emisoras desde un receptor de radio, los radiómetros espectrales de Terra permiten detectar la energía radiada en diferentes longitudes de onda. Si

MICHAEL D. KING encabeza la sección científica del proyecto EOS de la NASA. Desde el Centro Goddard de Vuelos Espaciales, donde trabaja desde 1978, King presta asistencia a centenares de expertos de todo el mundo que estudian el cambio climático a través de los satélites EOS. DAVID H. HERRING ha sido contratado para el proyecto EOS.



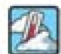
LAS CARACTERISTICAS CLIMATICAS empiezan ahora a recogerse en capas por el satélite Terra, día a día, en todo el planeta. Anteriores sensores del satélite rastrearon los signos vitales que componen esta imagen sintetizada de vegetación (*verde en continentes*), incendios forestales (*puntos rojos en continentes*), temperatura marina (*colores en océanos*) y manto de nubes. Las calientes aguas del Pacífico (*rojo*), frente a la costa occidental de Sudamérica, son un signo revelador de El Niño.

Terra y sus cinco sensores de vigilancia climática



Signos vitales
que va a medir Terra

 AEROSOLES

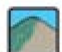
 TEMPERATURA DEL AIRE

 NUBES

 INCENDIOS

 GLACIARES

 TEMPERATURA DEL TERRENO

 USO DEL SUELO

 DESASTRES NATURALES

 PRODUCTIVIDAD MARINA

 TEMPERATURA MARINA

 CONTAMINACION

 RADIACION

 HIELOS EN EL MAR

 MANTO DE NIEVE

 VEGETACION

 VAPOR DE AGUA

esas longitudes de onda corresponden al rojo, verde y azul, podrán fácilmente componer una imagen visible. Pero si quedan fuera del espectro visible, como las del infrarrojo o ultravioleta, habrá que asignarles un color visible ("color falso") para que nuestros ojos puedan interpretar la imagen.

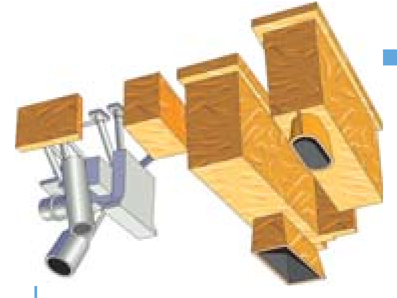
Aparte de los satélites, las misiones del EOS descansan sobre dos pilares fundamentales: un sistema que almacena la información y un grupo humano que la interpreta. El proyecto incorpora ya unos 850 científicos en entes estatales e instituciones académicas de todo el mundo. Lo que los satélites envían a la Tierra es un caudaloso torrente numérico —decenas de billones de bytes de información por semana— que para adquirir significado han de ser procesados. Una avanzada red de ordenadores, llamada EOSDIS (sistema de información y datos del EOS), recibe y procesa esa avalancha digital. Cuatro centros de EE.UU. archivan luego las mediciones tomadas por Terra y las distribuyen por igual a científicos y organismos civiles.

Este libre acceso a los datos contrasta radicalmente con muchas misiones espaciales del pasado, en gran medida inaccesibles a quienes no pertenecieran a organizaciones de investigación de élite. Una sola imagen obtenida por los satélites Landsat, el primero de los cuales se lanzó en 1972, puede costar cientos de miles de pesetas. Y por el contrario, ciertos datos recogidos por Terra pueden ser difundidos directamente por la banda X a cualquiera que tenga una estación receptora compatible y medios capaces de procesar y almacenar semejante volumen de información. Muchos sectores de mercado pueden sacar partido de los datos EOS. Por ejemplo, los mapas de productividad marina tomados por satélite pueden guiar las flotas pesqueras hacia bancos potencialmente ricos. De manera similar, las imágenes de campos sembrados pueden revelar si las cosechas prosperan o si corren riesgo. Con ayuda de estas imágenes los agricultores podrán visualizar situaciones de escorrentía en determinados campos y, a su vez, perfeccionar los métodos para averiguar cuándo y en qué cantidad hay que regar y abonar.

Más ojos en el cielo

Terra no es el único observador. Tres satélites más de EOS orbitan el globo y miden otros fenómenos climáticos vitales, como las variaciones de la energía solar y los vientos que azotan los océanos. Si estos instrumentos cumplen sus expectativas de vida útil, y el Congreso continúa financiando los trabajos de EOS, 15 o más nuevos satélites prolongarán su trabajo y en conjunto constituirán un banco de datos mundial extendido a 15 años. Para formular predicciones climáticas exactas, las mediciones tendrán que cubrir varias décadas.

Reuniendo las observaciones que recojan los sensores a bordo de Terra y demás satélites EOS, podrá desenredarse la intrincada maraña de causas y efectos que determinan el clima. Así, por ejemplo, al observar cómo se relaciona la deforestación con la pluviosidad y el manto de nubes se podrá evaluar el



ASTER

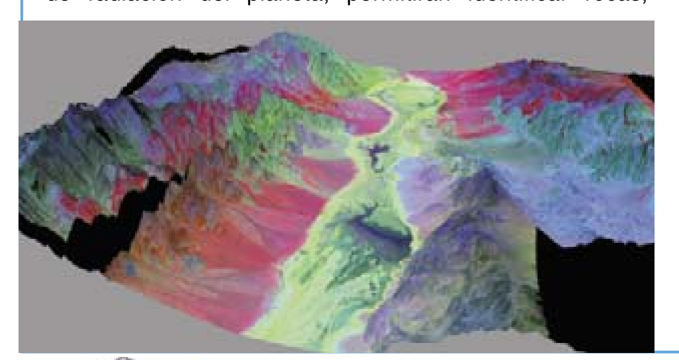
Radiómetro espacial de emisión y reflexión térmica avanzado

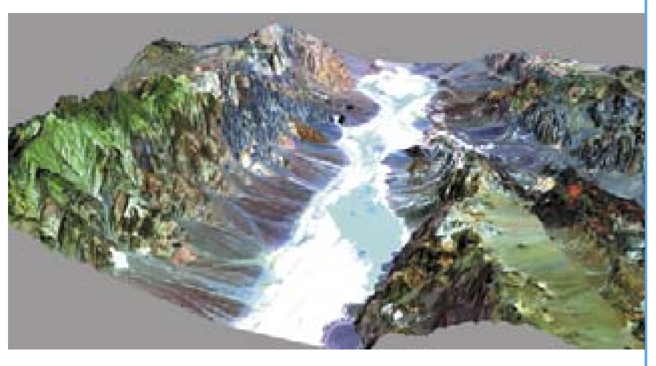
Signos vitales medidos:

Característica exclusiva: Máxima resolución espacial entre todos los sensores de Terra y capacidad única de apuntar hacia blancos especiales
Sensores: Tres subsistemas telescópicos que observan las longitudes de onda de las porciones de espectro visible e infrarrojo cercano, infrarrojo en onda corta e infrarrojo térmico
Patrocinador: Ministerio de Industria y Comercio Exterior de Japón
Resolución espacial: Entre 90 y 15 metros

El suelo de nuestra Tierra emite energía y temperaturas que ASTER mide con resolución ultraelevada. Estos signos de vida, esenciales para estimar la cantidad de radiación del planeta, permitirán identificar rocas, suelos y vegetación. Los agricultores pueden valerse de estas imágenes multiespectrales de alta resolución para apreciar cómo afectarán los cambios de temperatura, la inclinación del terreno y el tipo de suelo a la calidad de sus cosechas. ASTER vigilará también otras alteraciones en curso: retroceso de los glaciares y las capas de hielo, desertización, deforestación, inundaciones e incendios forestales. Ayudará así a distinguir los cambios naturales de los antropogénicos. Dado que los telescopios de ASTER pueden orientarse hacia volcanes en erupción y otros blancos especiales, podrán generar imágenes estereoscópicas detalladas que mejorarán los mapas topográficos digitales del planeta. Se ampliará con ello la colección que los satélites Landsat vienen reuniendo desde 1972.





ROCAS Y VEGETACION cobran vida con falsos colores en esta imagen ASTER simulada de una franja de 60 kilómetros de anchura en el californiano Valle de la Muerte. Un sensor detecta la luz infrarroja térmica (*izquierda*), que expone la composición del suelo: las rocas ricas en cuarzo aparecen en rojo, los depósitos de sal en verde suave, y así sucesivamente. Registrando la misma escena con luz infrarroja de menor longitud de onda y luz visible (*arriba*) la vegetación es verde, azul el agua y de color naranja las rocas ricas en hierro.



CERES

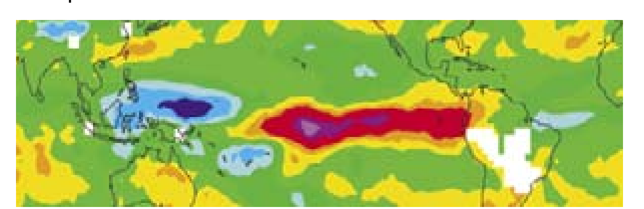
Medidor de las nubes y el sistema de radiación de energía de la Tierra

Signos vitales medidos:

Característica exclusiva: Primer sensor de satélite que registra flujos de radiación a través de la atmósfera
Sensores: Dos radiómetros exploradores de banda ancha
Patrocinador: Centro Langley de Investigación de la NASA
Resolución espacial: 20 kilómetros

La predicción de la temperatura mundial requiere claras ideas sobre la cantidad de radiación que entra y sale de la atmósfera terrestre, en forma de calor y de luz solar. Sin embargo, hasta la fecha los expertos no han podido justificar el destino del 8 por ciento de la radiación solar que entra en la atmósfera. Una explicación podría ser que las nubes y aerosoles —diminutas partículas de humo y polvo— absorben energía y la dispersan en las capas atmosféricas inferiores, nunca examinadas por los satélites que rastrean flujos de energía. Para cuantificar mejor el papel que desempeñan las nubes en el sistema de energía terrestre, CERES (con entrada tomada de MODIS) medirá el flujo de radiación con una precisión doble de la de los sensores anteriores, tanto en el límite superior de la atmósfera como en la superficie del planeta. Los instrumentos de CERES enriquecen el legado que iniciaran los sensores espaciales ERBE (experimento sobre la cantidad de radiación terrestre) de la NASA, allá por los años ochenta.



LOS PRIMEROS SENSORES CERES registraron los cambios mayores observados hasta entonces en la radiación emitida al espacio desde el Pacífico oriental en febrero de 1998. El calentamiento de las aguas, generado en el apogeo de El Niño, aumentó la aparición de nimbocúmulos, que a su vez atraparon mayor cantidad de radiación térmica del océano y de la atmósfera inferior (*rojo*).

influjo de la pérdida de masa forestal sobre el ciclo hidrológico. La comparación de mediciones similares tomadas por distintos sensores ayudará a confirmar que todos los instrumentos perciben las mismas señales y que los dispositivos de calibración a bordo funcionan correctamente. Asimismo, se compararán las mediciones de los satélites con las tomadas por docenas de instrumentos instalados en aviones, en barcos y boyas, así como en tierra firme.

El proceso de diagnosis del clima ocupa cientos de horas de ordenador. La primera "instantánea" en cuatro dimensiones de nuestro planeta probablemente no estará lista hasta el próximo invierno, y a partir de entonces habrá que esperar muchos años hasta completar la primera evaluación estadística cabal. Las interrelaciones del sistema climático terrestre son muy complejas, y lo descrito aquí apenas si roza la epidermis de lo que puede lograr la misión Terra.



MOPITT

Mediciones de contaminación en la troposfera

Signo vital medido:



Característica exclusiva: Primer sensor de satélite que localiza la fuente de contaminación
Sensor: Radiómetro explorador que utiliza espectroscopía con correlación de gases
Patrocinador: Agencia Espacial Canadiense
Resolución espacial: 22 kilómetros

Dos gases traza no se le escaparán a MOPITT, que mide la distribución y concentración global del metano y el monóxido de carbono (CO) en la atmósfera inferior. Se sabe que el metano —gas de invernadero con casi 30 veces la capacidad de atrapar calor del dióxido de carbono (CO_2)— se desprende de las ciénagas, los rebaños y los depósitos de hielo bajo el fondo del mar, pero no se conoce cuánto producen esas fuentes por separado. El metano se acumula en la atmósfera inferior a un ritmo cercano al 1% anual. El CO, emitido por fábricas, automóviles e incendios forestales, dificulta la capacidad natural de la atmósfera para liberarse de otros agentes químicos dañinos. MOPITT, primer sensor de satélite que utiliza espectroscopía con correlación de gases, es capaz de distinguir estos dos gases de todos los demás, como el CO_2 y el vapor de agua. Al penetrar en el sensor el calor emitido o la luz solar reflejada, pasa a través de unos depósitos de CO y metano transportados a bordo, produciendo una señal que se correlaciona con la presencia de dichos gases en la atmósfera.

EL MONOXIDO DE CARBONO se acumula sobre Sudamérica en esta simulación informática. Las altas concentraciones de gas (*rojo* y *amarillo*) se originan en incendios forestales para despejar terrenos, y los vientos del este las transportan sobre el océano Pacífico.



MISR

Radiómetro espectral con imágenes multiangulares

Signos vitales medidos:



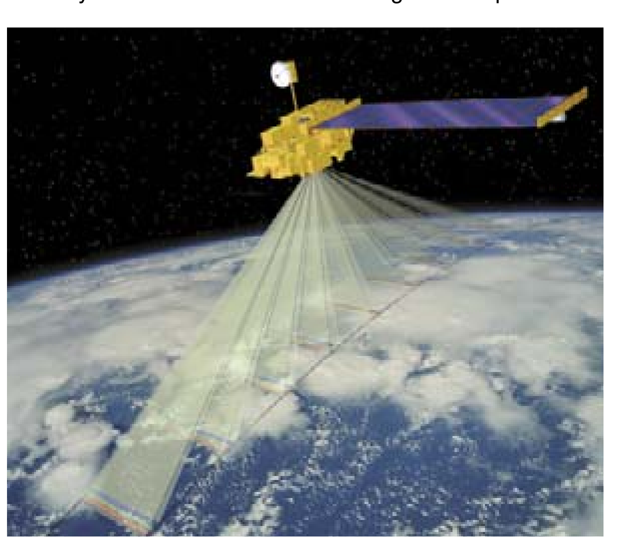






Característica exclusiva: Produce imágenes estereoscópicas de nubes y columnas de humo
Sensores: Nueve cámaras CCD (dispositivos de carga acoplada)
Patrocinador: Laboratorio de Propulsión a Chorro
Resolución espacial: Desde 1,1 kilómetros hasta 275 m

Ningún instrumento como el MISR ha volado jamás por el espacio. Al contemplar la Tierra bañada por el sol desde nueve ángulos a la vez, muy separados, el MISR capta imágenes globales de la luz solar reflejada en cuatro colores (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano). La manera en que cambian las reflexiones de un ángulo de visión a otro permitirá distinguir diferentes tipos de nubes, aerosoles y superficies de suelo. Las imágenes de MISR combinadas con técnicas estereoscópicas sirven para diseñar modelos tridimensionales que ayudarán a detectar el origen de aerosoles y columnas de humo. Y dado que el MISR rodea el globo por el ecuador cada nueve días, sus mediciones multiangulares brindarán una mejor comprensión del papel de nubes y aerosoles en el balance energético del planeta.



NUEVE ANGULOS DE VISION SIMULTANEOS permiten a MISR la medición estereoscópica de las interacciones entre aerosoles, nubes y radiación.

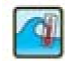
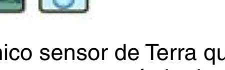


MODIS

Radiómetro espectral con imágenes de resolución moderada

Signos vitales medidos:

Característica exclusiva: Unico sensor de Terra que ve la superficie entera del planeta en un período de uno a dos días
Sensores: Cuatro juegos de detectores, sensibles a la luz visible y a las radiaciones en las porciones cercanas, de onda corta, de onda media y térmica del espectro de infrarrojos
Patrocinador: Centro Goddard de Vuelos Espaciales
Resolución espacial: Desde 1 kilómetro hasta 250 metros

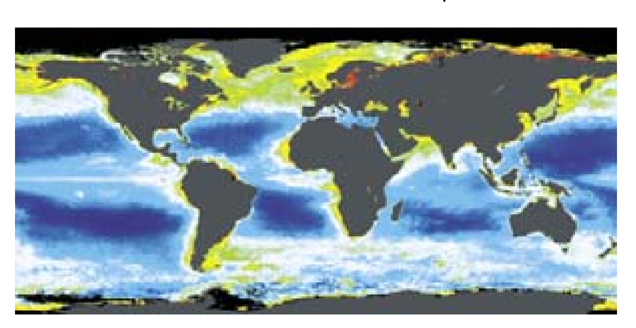
Al observar el globo entero en 36 bandas espectrales discretas, MODIS realiza el seguimiento de un grupo de signos vitales del planeta con mayor amplitud que cualquier otro sensor de Terra. Por ejemplo, el sensor mide el porcentaje cubierto por nubes de la superficie terrestre casi todos los días, barriendo por franjas visibles de 2230 kilómetros de anchura. Tan amplia cobertura espacial, juntamente con MISR y CERES, capacita a MODIS para determinar el efecto de las nubes en el balance energético del planeta, contribución muy importante teniendo en cuenta que las nubes constituyen el área de mayor incertidumbre en los modelos del clima. El sensor posee un canal sin precedente (centrado en longitud de onda 1,375 micrometros) para detectar los deshilachados cirros que se presume que contribuyen al calentamiento global, al atrapar el calor emitido desde la superficie. Asimismo, MODIS observará cómo se mezclan los humos y otros aerosoles con las nubes y alteran su capacidad para absorber y reflejar energía.

Vigilando la cobertura de nubes mundial, MODIS ayudará también a localizar cambios sobre la superficie terrestre. El sensor cartografiará las extensiones de nieve y hielo que producen las tormentas invernales y las gélidas temperaturas. Observará el desplazamiento de "la onda verde" a través de los continentes cuando el invierno da paso a la primavera y brota la vegetación. Podrá ver cuándo y dónde ocurren desastres —erupciones volcánicas, inundaciones, tormentas torrenciales, sequías y devastadores incendios— y guiar así la evacuación de la gente desde lugares peligrosos. Las bandas del MODIS son muy sensibles a los fuegos; distinguen combustiones sin llama y aportan las mejores estimaciones de aerosoles y gases que liberan a la atmósfera.

El sensor constituye un dispositivo ideal para seguir los cambios a gran escala de la biosfera y aporta valiosa información sobre el comportamiento del ciclo global del carbono. Aunque no existe todavía ningún sensor de satélite que mida directamente las concentraciones de CO_2 en la atmósfera, MODIS determina la actividad fotosintética de las plantas para estimar qué cantidad absorben de gases de invernadero. El sensor examinará, además, la biosfera marina midiendo el resplandor fluorescente de la clorofila en el océano (*imagen a la izquierda*).



LA CUBIERTA DE NIEVE, tal como la de esta escena tomada por el satélite WiFS de la NASA tras la ventisca del 25 de enero en el este de EE.UU., es uno de los numerosos factores climáticos que mide MODIS.



LA CLOROFILA de las plantas del océano refleja intensamente la luz verde (*en amarillo, rojo y verde, arriba*); el satélite SeaWiFS detecta su abundancia. MODIS va un paso más allá observando la intensidad de la fluorescencia vegetal, indicativa de su productividad de las plantas.

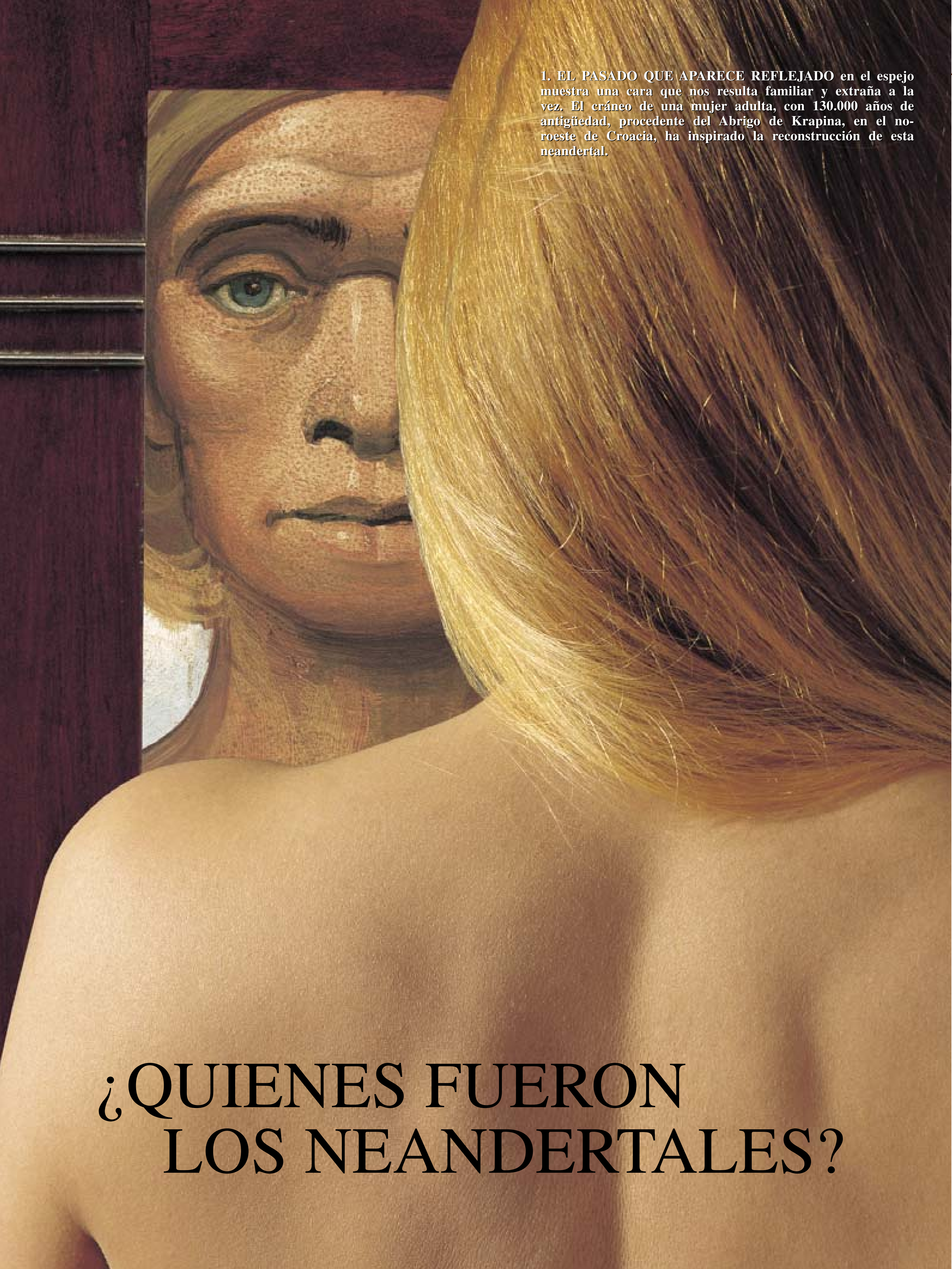
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MISSION TO PLANET EARTH: ROLE OF CLOUDS AND RADIATION IN CLIMATE. Bruce A. Wielicki, Robert D. Cess, Michael D. King, David A. Randall y Edwin F. Harrison en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 76, n.º 11, págs. 2125-2154; noviembre de 1995.

EARTH FROM ABOVE: USING COLOR-CODED SATELLITE IMAGES TO EXAMINE THE GLOBAL ENVIRONMENT. Claire L. Parkinson. University Science Books, Sausalito, California, 1997.

EOS SCIENCE PLAN: THE STATE OF SCIENCE IN THE EOS PROGRAM. Michael D. King. NASA NP-1998-12-069-GSFC, 1998.

Sitio Web del EOS de la NASA: http://earthobservatory.nasa.gov



1. **EL PASADO QUE APARECE REFLEJADO en el espejo muestra una cara que nos resulta familiar y extraña a la vez. El cráneo de una mujer adulta, con 130.000 años de antigüedad, procedente del Abrigo de Krapina, en el noroeste de Croacia, ha inspirado la reconstrucción de esta neandertal.**

¿QUIENES FUERON LOS NEANDERTALES?

Estos homínidos se cruzaron con humanos de anatomía moderna y adquirieron en algunos casos una conducta avanzada. Pero las pruebas que avalan esa tesis son objeto de controversia

Kate Wong

El relato era sencillo y claro. Sin nada que se les opusiera, los humanos de anatomía moderna se expandieron con una cultura y recursos técnicos elaborados, invasión que provocó la extinción de los neandertales, una especie distinta. Pero las descripciones simplistas de nuestro pasado acostumbran velar misterios. La historia de los neandertales no es una excepción. Durante más de 200.000 años, estos homínidos de un cerebro notable habitaron en Europa y Asia occidental, luchando contra los intensos fríos de las épocas glaciales y los peligros constantes de la vida prehistórica. Han desaparecido. Pese a esa doble realidad, la ciencia sigue debatiendo con calor la identidad, modo de vida y sino de los neandertales.

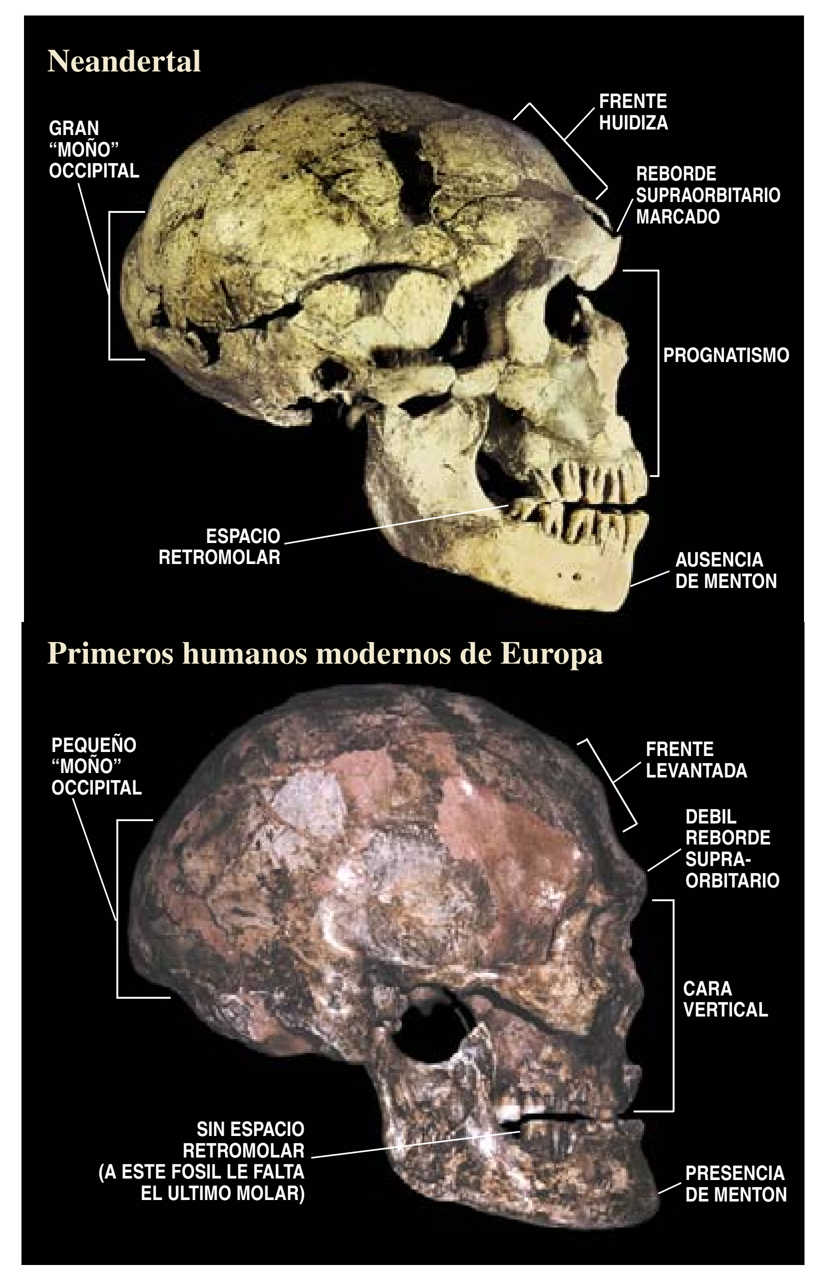
El mayor empeño puesto en la resolución de cuestiones tan esquivas va asociado a una polémica de mayor vuelo, la centrada en torno a la aparición de la humanidad actual. Unos investigadores abogan por un origen reciente de nuestra especie, hace unos 200.000 años, en Africa; sustituiría a las poblaciones más antiguas de humanos en todo el mundo. Otros autores proponen que los grupos arcaicos contribuyeron al patrimonio genético de la humanidad actual. Los neandertales, el mejor conocido de tales grupos, resultan decisivos para deshacer el dilema. Ahora bien, se trata de algo más que una simple explicación científica sobre determinados sucesos de nuestro pasado remoto. Al investigar sobre la biología y el comportamiento de los neandertales, hay que preguntarse qué significa ser humano en su plenitud y descubrir, si acaso existe, la razón que singulariza a la humanidad actual. Ante los hallazgos recientes, los paleoantropólogos y los arqueólogos se preguntan con creciente insistencia hasta dónde llegaba el parecido entre el neandertal y el hombre moderno.

Desde que, en 1856, se descubrió el esqueleto parcial de un neandertal, en el valle de Neander (Alemania), vienen los paleontólogos dándole vueltas a la comparación de marras. Habida cuenta de los rasgos peculiares de aquellos restos (cráneo muy robusto, con el característico reborde óseo por encima de los ojos, y huesos de las extremidades muy macizos), se creó una especie propia para los neandertales, *Homo neanderthalensis*. Ya entonces hubo discrepancias, y algunos expertos alemanes atribuyeron el fósil a un jinete cosaco deforme. Cincuenta años más tarde, se descubrió en Francia el famoso esqueleto de "el Viejo" de la Chapelle-aux-Saints, cuya descripción contribuyó a considerar protohumanos primitivos a los neandertales. Se les representaba como brutos simiescos, torpes y encorvados, en claro contraste con la postura erguida y estampa grácil del *Homo sapiens*. El neandertal venía a ser un monstruo idiota que no había traspasado el umbral evolutivo de la humanidad.

Decenios más tarde, nuevos estudios del esqueleto de La Chapelle pusieron en evidencia la incorrecta interpretación dada a ciertos rasgos anatómicos. La verdad dictaba que la postura y la locomoción neandertales eran idénticas a las nuestras. Desde entonces, los paleoantropólogos intentan determinar si las características definidoras del grupo de los neandertales —esqueleto robusto, extremidades cortas, tórax en barril, arcos supraorbitarios resaltados, frente baja e inclinada, faz prominente y mandíbulas sin mentón— son suficientes para considerarlos una especie distinta. Se está de acuerdo en que algunos de estos rasgos denotan adaptaciones al medio. Así, su cuerpo bajo y robusto les permitiría retener mejor el calor en el clima extremado de las glaciaciones. Pero en otros rasgos, como la forma del reborde supraorbitario, no se aprecia un claro significado funcional y parecen deberse a la deriva genética que se produce en poblaciones aisladas.

Según los defensores del modelo de sustitución para el origen de la humanidad actual, la morfología distintiva de los neandertales es el resultado de una trayectoria evolutiva diferente de la recorrida por los humanos modernos. Desde hace años, otros paleontólogos vienen rechazando esa interpretación y sostienen que muchos de los rasgos que caracterizan a los neandertales se pueden también observar en los primeros humanos modernos de Europa. "Sin duda, presentaban una serie de rasgos que, tomados en conjunto, son distintos, pero se trata de una diferencia que reside en la frecuencia, no es una diferencia absoluta", afirma David W. Frayer, paleoantropólogo de la Universidad de Kansas. "En líneas generales, cuanto podemos encontrar en los neandertales, se puede dar en otra parte."

Frayer pone de ejemplo a uno de los humanos modernos europeos más antiguos, un fósil procedente del yacimiento de Vogelherd, en el sudoeste de Alemania. En él se combinan la forma del cráneo de los humanos modernos con rasgos genuinamente neandertales; verbigracia, la presencia de un espacio retromolar (un vacío claro entre el último molar y la rama ascendente de la mandíbula) y la forma del foramen mandibular, el canal de un nervio de la mandíbula. A ello hay que agregar la información que, según Frayer y Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan, aporta un grupo de primeros humanos modernos descubiertos en



2. CARACTERISTICAS QUE DISTINGUEN a un neandertal, representado por el cráneo de La Ferrassie (Francia), y a un humano moderno, Dolní Věstonice 16, procedente de la República Checa. Cada uno de los rasgos puede aparecer por separado en cualquiera de los dos grupos, variando en grado y en frecuencia, pero la tendencia es que se den de forma conjunta.

el yacimiento de Mladeč (Moravia). En su opinión, las gentes de Mladeč tienen en sus cráneos características que otros han considerado rasgos exclusivos de los neandertales.

Con anterioridad, esos datos se habían esgrimido para respaldar la posibilidad de que los neandertales evolucionaran de forma independiente hacia los europeos modernos. Pero esa idea ha cambiado. “Hubo poblaciones que penetraron en Europa, eso está claro. Y así, las poblaciones posteriores resultaron del cruzamiento entre neandertales y los humanos que migraron a Europa”, expone Wolpoff, para quien ambos grupos diferían entre sí no más que los europeos actuales y los aborígenes australianos. En opinión de Fred H. Smith, paleoantropólogo de la Universidad de Northern Illinois, aparecen también pruebas de esa hibridación en los fósiles de neandertales más tardíos. Los restos de neandertales de la cueva de Vindija, en el noroeste de Croacia, reflejan “la asimilación de algunas características de los humanos modernos”, declara, refiriéndose a los rebordes supraorbitarios con morfología moderna y a la insinuación de un ligero mentón en la mandíbula.

Para quienes los neandertales formaban una especie distinta, resultan demasiado fragmentarios los fósiles de Vindija, insuficientes para concederles valor diagnóstico; en su opinión, todos los parecidos que existen pueden explicarse por convergencia evolutiva. Y con respecto a los humanos modernos de Mladeč descartan que se trate de híbridos. “Cuando observo la morfología de esta población, sólo distingo robustez; no veo a un neandertal”, ratifica Christopher B. Stringer, del Museo de Historia Natural de Londres.

Los que cuestionan la tesis del cruzamiento entre ambos grupos se apoyan también en los resultados de Svante Pääbo. Logró éste con su equipo de la Universidad de Munich, en julio de 1997, la obtención y análisis ulterior del ADN mitocondrial (ADNmt) de un fósil de neandertal. La portada del número de la revista *Cell* donde apareció el informe anunciaba sin ambages: “Los neandertales no fueron nuestros antepasados”. A partir del corto segmento de ADNmt que secuenciaron, el laboratorio de Pääbo determinó que las diferencias entre el ADNmt de los neandertales y el ADNmt de la humanidad actual eran mucho mayores que las registradas entre distintas poblaciones humanas actuales. Aunque en la superficie parecía resuelta la cuestión de la especie, quedaban por despejar interrogantes de fondo.

Nuevos descubrimientos en el registro fósil de Europa occidental han incrementado el interés sobre la posibilidad de hibridación entre neandertales y humanos modernos. En enero de 1999, se anunció un hallazgo valiosísimo. Ocurrió en el valle de Lapedo, en el centro de Portugal. Se trataba de un esqueleto muy completo de un niño de cuatro años que había sido enterrado hace 24.500 años, siguiendo el ritual gravetiense; aparece éste en otros yacimientos de humanos modernos de Europa de esa misma época. Según Erik Trinkaus, de la Universidad de Washington, y Cidália Duarte, del Instituto Portugués de Arqueología de Lisboa, y sus colaboradores, el esqueleto, denotado Lagar Velho 1, presenta una combinación de rasgos neandertales y de humanos modernos que sólo puede ser el resultado de cruzamiento habitual entre ambas poblaciones.

Si la hipótesis de hibridación para Lagar Velho 1 supera nuevos análisis, adquirirá mayor fuerza la idea de que los neandertales sólo fueron una variedad de nuestra especie. Los que defienden el modelo de sustitución admiten que, de forma ocasional, pudieran cruzarse humanos modernos y especies arcaicas; no es insólito el

cruzamiento interespecífico de mamíferos estrechamente emparentados. Pero hay aquí una novedad. A diferencia de los individuos del centro y este de Europa a los que se atribuye mezcla de rasgos, el niño portugués procede de una época en la que los neandertales habían dejado de existir. Para que los rasgos neandertales persistieran miles de años después de su extinción, se requiere, postulan Trinkaus y Duarte, un grado de cruzamiento significativo entre poblaciones coetáneas de neandertales y humanos modernos.

Su interpretación no quedó sin réplica. En un comentario que acompañaba al artículo del equipo, aparecido en junio de 1999, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, los paleoantropólogos Ian Tattersall, del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, y Jeffrey H. Schwartz, de la Universidad de Pittsburgh, respondían que Lagar Velho 1 pertenecía a "un niño robusto gravetiense". Las vigorosas proporciones corporales que Trinkaus y su equipo ven como prueba de antepasados neandertales, agrega Stringer, pueden sólo ser la adaptación al clima frío que había en Portugal por entonces. Una explicación que objeta Jean-Jacques Hublin, del CNRS de Francia; según éste, aunque algunos humanos modernos adaptados a climas fríos muestran estas proporciones corporales, no se conoce ninguno durante esa época en Europa. A Hublin le

Glosario

Neandertal, *Neanderthal*. Hacia 1900 la ortografía del alemán cambió, y en algunas palabras desapareció la "h" sorda, como es el caso de "thal" (que significa "valle"). La designación científica, *Homo neanderthalensis*, sigue siendo la misma, pero el nombre común puede escribirse de ambas formas.

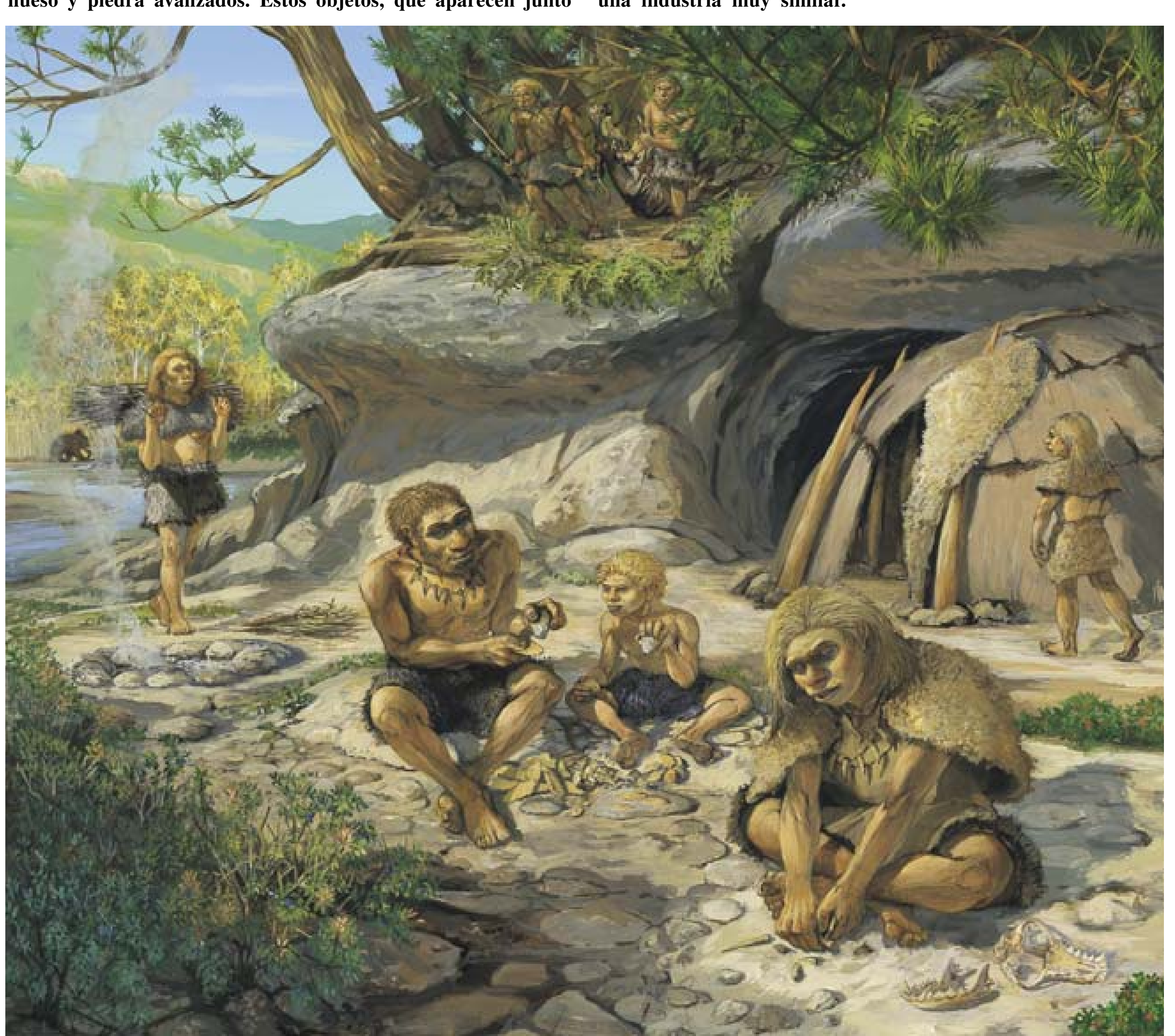
Paleolítico. Período que abarca desde la aparición de la cultura hasta el final de la última glaciación. Se divide en tres períodos: inferior, medio y superior.

Musteriense. Tipo de industria lítica del Paleolítico medio asociado a los neandertales y a los primeros humanos modernos en el Próximo Oriente.

Auriñaciense. Tipo de industria lítica que aparece asociada a los humanos modernos; comprende instrumentos muy elaborados y objetos artísticos.

Chatelperroniense. Tipo de industria lítica del Paleolítico superior asociado a los neandertales. Presenta características intermedias entre el Musteriense y el Auriñaciense.

3. VIDA DIARIA DE LOS NEANDERTALES de la Grotte du Renne, en Francia. Los niveles estratigráficos chatelperronienses han suministrado un conjunto de colgantes e instrumentos de hueso y piedra avanzados. Estos objetos, que aparecen junto a indicios de cabañas y de fuegos, se atribuían en exclusividad a los humanos modernos, pero los restos de la Grotte du Renne muestran que los neandertales habían desarrollado una industria muy similar.



El niño híbrido de Portugal por Erik Trinkaus y Cidália Duarte

En una fría tarde de noviembre de 1998, mientras inspeccionaban el Abrigo do Lagar do Velho, un refugio del valle de Lapedo, en el centro de Portugal, dos arqueólogos vieron el sedimento removido de la madriguera de algún roedor a lo largo de la pared del abrigo. Conociendo que los animales cuando excavan el terreno, a menudo sacan a la superficie materiales mucho más profundos, uno de los exploradores se acercó para curiosear qué podían haber desenterrado. Al retirar la mano, se vio con algo extraordinario: los huesos de un niño enterrado de unos 25.000 años de antigüedad.

La excavación posterior de este enterramiento, dirigida por uno de nosotros (Duarte), nos indicó que el niño, de cuatro años, había sido enterrado siguiendo un ritual (cubierto por ocre rojo y sobre una capa de vegetación quemada, junto a un diente de ciervo perforado y una concha marina), según el estilo de las tumbas del Gravetiense, típico de humanos modernos de ese período en otras partes de Europa. Teniendo en cuenta el abrupto cambio cultural que se observa en los yacimientos arqueológicos de la península Ibérica, parecía verosímil que cuando los humanos modernos llegaron a esta área, hace 30.000 años, sustituyeran muy pronto a los neandertales nativos. Era de todo punto razonable que este individuo, denominado Lagar Velho 1, perteneciera a un niño humano moderno. De hecho, al principio no pensábamos que pudiese tratarse de otra cosa.

Este esqueleto, bastante completo, presenta toda una serie de rasgos que lo asemejan a los primeros humanos modernos de Europa. A saber: un mentón prominente y ciertos pormenores de la mandíbula, dentición anterior pequeña, proporciones e inserciones musculares del pulgar características, estrechez de la parte anterior de la pelvis, más algunos aspectos de la escápula y de los huesos del antebrazo. Otros rasgos sugieren afinidades neandertales, especialmente en la parte anterior de la mandíbula (inclinada hacia atrás pese a la presencia de mentón), ciertos rasgos en los incisivos, las inserciones de los músculos torácicos, las proporciones de la rodilla y las pantorrillas cortas. De esta forma, el niño de Lagar Velho evidencia un complejo mosaico de caracteres humanos modernos y neandertales.

Tamaña mezcla anatómica no es el resultado de ninguna patología. De acuerdo con las pautas de desarrollo de los humanos actuales, nuestro análisis indica que, excepto en un brazo lesionado, donde unas pocas líneas en el hueso revelan que el crecimiento sufrió una ligera interrupción (por desnutrición o enfermedad) y el hecho de que muriese siendo niño, Lagar Velho 1 tuvo un desarrollo normal. Esta combinación sólo pudo deberse al cruzamiento, fenómeno del que no se tenía constancia en Europa occidental. Así llegamos a la conclusión de que Lagar Velho 1 era el resultado de la hibridación entre neandertales ibéricos indígenas y primeros humanos modernos que se dispersaron, hace algo menos de 30.000 años, por la península Ibérica. Además, el niño, que vivió algunos miles de años después de la desaparición de los neandertales, refleja probablemente en su anatomía la mezcla de estas poblaciones durante el período en que convivieron. No es, pues, un caso anecdótico de cruzamiento entre neandertal y humano moderno primitivo.

En los trabajos de excavación llevados a cabo durante el verano de 1999 se recuperó gran parte del cráneo y la dentición, junto a otro material arqueológico. Además, con el fin de interpretar mejor a sujeto tan importante, hemos organizado un equipo internacional que examine con detenimiento el esqueleto. Se realizarán tomografías (TAC) del cráneo y huesos de las extremidades, para su análisis subsiguiente, y se procederá a la reconstrucción informática virtual del cráneo dañado. Es imprescindible un estudio riguroso porque el descubrimiento de este esqueleto con

MOSAICO DE RASGOS morfológicos de un esqueleto de 24.500 años de antigüedad, hallado en Portugal. De su examen se desprende que neandertales y humanos modernos pertenecían a una misma especie, cruzándose entre ellos sin barreras genéticas. Este niño, denominado Lagar Velho 1, moderno en la mayoría de sus estructuras anatómicas, presenta huesos cortos de las extremidades inferiores y una mandíbula inclinada hacia atrás, que son rasgos neandertales.

desconcierta otro punto, a saber, el hecho de que Lagar Velho 1 pertenezca a un niño, pues “no conocemos nada sobre la variabilidad infantil entre niños de una misma edad de esa época”.

¿Cómo lograban sobrevivir?

Además de las cuestiones taxonómicas, la investigación se ha ocupado del comportamiento de los neandertales, interpretado de forma errónea hasta hace poco. Creíase antaño que los neandertales no estaban capacitados para la caza ni para diseñar proyectos de futuro, recuerda John J. Shea, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook: “Se les supuso incapaces de sobrevivir a un solo invierno, olvidando que resistieron durante un cuarto de millón de años en las peores condiciones que han conocido los humanos”, subraya. Además, el análisis de los restos de animales procedentes del yacimiento croata de Krapina revela que los neandertales eran hábiles cazadores, pertrechados para abatir rinocerontes y otros animales de talla similar, como indica Preston T. Miracle, de la Universidad de Cambridge. Los estudios de Shea mostraron que algunos neandertales usaban lanzas trabajadas y con puntas líticas para matar la presa; conclusión que corroboraron en 1999 otros investigadores tras encontrar, en Siria, una punta lítica neandertal entre los huesos del cuello de un asno salvaje. A mayor abundamiento, otros trabajos de Shea e investigaciones realizadas por Mary C. Stiner y Steven L. Kuhn, de la Universidad de Arizona, ponen de manifiesto que las estrategias de subsistencia de los neandertales cambiaban con las condiciones ambientales y la estación del año.

Estas pruebas refutan la tesis que atribuye la extinción de los neandertales a su incapacidad para adaptarse. Lo que no obsta para que los humanos modernos pudieran ser mejores en ello. Se halla muy extendida la idea de que los humanos modernos aventajaban a los neandertales en habilidad mental, en concreto en una propiedad genuinamente humana: el pensamiento simbólico con el



un mosaico morfológico tiene profundas implicaciones. En primer lugar, refuta el rígido modelo de un origen exclusivamente africano de la humanidad actual (modelo "A partir de Africa"), que propone que los humanos modernos originarios de Africa sustituyeron a todos los humanos arcaicos de otras regiones. Por contra, la anatomía del niño de Lagar Velho 1 nos transporta a una situación que combina la dispersión, a partir de Africa, de los humanos de anatomía moderna con la mezcla de esta población y las poblaciones arcaicas que encontraron a su paso. [La procedencia africana de los humanos modernos iniciales aparece reflejada en las extremidades inferiores relativamente largas, una adaptación tropical. No obstante, Lagar Velho 1, tiene las pantorrillas cortas igual que los neandertales, adaptados a un clima frío.]

Lagar Velho 1 también suministra pruebas de un comportamiento similar entre neandertales y humanos modernos. A pesar de que los datos paleontológicos indican diferencias anatómicas entre ambos grupos, no pudieron divergir mucho en cuanto a pautas generales de adaptación, conducta social y forma de comunicación, lenguaje incluido. Para sus contemporáneos, los neandertales eran un grupo más de cazadores recolectores del Pleistoceno, tan humanos como ellos mismos.

ERIK TRINKAUS es paleoantropólogo de la Universidad de Washington.

CIDÁLIA DUARTE, osteóloga del Instituto Portugués de Arqueología en Lisboa, realiza su investigación doctoral en antropología física en la Universidad canadiense de Alberta.

lenguaje incluido. Se funda esa visión en que, después de 40.000 años, la cultura neandertal se mantuvo sin cambiar apenas, en tanto que la de los humanos modernos creó un sinfín de innovaciones, muchas de ellas de carácter simbólico. Sólo los humanos modernos realizaban, se dice, enterramientos de cierta complejidad, se expresaban a través de adornos corporales, esculturillas y pinturas rupestres y tallaban útiles de hueso y cuerna refinados; en una palabra, desarrollaron la industria del Paleolítico superior. La cultura material asociada a los neandertales, por contra, sólo ofrecía útiles líticos del Paleolítico medio de estilo musteriense.

Mas entre los neandertales han aparecido también signos de pensamiento simbólico. Así, se han encontrado enterramientos neandertales en toda Europa, algunos de ellos provistos de objetos rituales. (Según ciertos autores, sin embargo, los neandertales enterraban los muertos para ocultar la descomposición del cuerpo, que habría atraído la visita de predadores, y los supuestos objetos rituales serían un batiburrillo de cosas que se deslizaron al azar hasta la tumba.) En algunos yacimientos se han recogido también dientes perforados, fragmentos de huesos grabados y ocre amarillo y rojo, muestras todas ellas de creatividad artística, que, por su relativa escasez, admiten, no obstante, una explicación diferente.

La posibilidad de que los neandertales hubieran desarrollado usos modernos se tomó en mayor consideración cuando, en 1980, se descubrió un espécimen en el abrigo de Saint-Césaire (Charente-Maritime); apareció asociado con instrumentos líticos pertenecientes al Chatelperroniense, industria lítica que se había atribuido a los humanos modernos. Además, en 1996, el equipo de Hublin hizo pública una noticia que puso al Chatelperroniense en el centro de atención de los arqueólogos. Las excavaciones iniciadas a finales de los años

Un ejemplo de cultura neandertal por João Zilhão y Francesco d'Errico

Desde el descubrimiento, hace casi siglo y medio, del espécimen que sirvió para definir a los neandertales, se han venido negando a los neandertales las habilidades que poseen los humanos modernos, como son el recurso a símbolos y empleo de técnicas complejas en la manufactura de sus útiles. Los neandertales han sido caracterizados como subhumanos, aferrados a su tradición e impermeables a las innovaciones. Y cuando aparecían restos culturales avanzados junto a los últimos neandertales, en diversos yacimientos de Europa occidental, se buscaba otro tipo de explicación para tales signos. Entre los yacimientos destaca por su espectacularidad la Grotte du Renne. Situada la cueva en el norte de Francia, en la serie de yacimientos de Arcy-sur-Cure, se encontraron, en asociación con fósiles de neandertales, abundantes instrumentos de piedra y hueso muy elaborados, adornos corporales y objetos decorados. En otros yacimientos franceses y a lo largo de la cordillera Cantábrica y del Pirineo también se han hallado artefactos similares efectuados según la misma pauta, la cultura del Chatelperroniense.

Puesto que los primeros humanos modernos de Europa desarrollaron una industria lítica equiparable, la cultura del Auriñaciense, que aparece en los mismos yacimientos que contienen materiales chatelperronienses, algunos autores han sugerido un deslizamiento de niveles arqueológicos, en virtud del cual artefactos auriñacienses penetrarían en los niveles asociados a los neandertales. Según otros, semejante confusión de objetos se debería a que los neandertales tomaron de los humanos modernos esas creaciones, ya fuera recogiéndolas, ya fuera intercambiando objetos manufacturados por los humanos modernos o imitando incluso el estilo de los recién llegados, en el bien entendido de que ellos eran incapaces de captar la naturaleza simbólica de algunos de estos objetos.

Pero de nuestra investigación de tales restos se infiere que los útiles y los adornos corporales que aparecen asociados a los neandertales no son el resultado de la mezcla de estratos arqueológicos; lo demuestra la presencia en el mismo nivel de objetos acabados y restos desechados de su manufactura. Además, los artefactos chatelperronienses recuperados en la Grotte du Renne y Quinçay, yacimiento de la región francesa de Poitou-Charentes, fueron trabajados mediante técnicas distintas de las empleadas por los auriñacienses. Así, en lo concerniente a los colgantes (dientes de osos, lobos, ciervos, entre otros), los neandertales hendían un surco alrededor de la raíz para sujetarlos con alguna suerte de cordón, mientras que los auriñacienses los perforaban. Según describiera ya François Lévêque y un colaborador, incluso en los casos en que los neandertales agujereaban el diente, lo hacían de forma diferente, golpeando con una punta la raíz. Los humanos modernos, en cambio, preferían rascar pausadamente el diente hasta perforarlo.

De modo similar, las nuevas técnicas de talla y los tipos de instrumentos que aparecen entre los últimos neandertales de otros yacimientos de Francia, Italia y España no muestran ninguna influencia del Auriñaciense. Sí mantienen afinidades con las tradiciones locales anteriores; parece, pues, deberse a un desarrollo autónomo.

Si la cultura chatelperroniense de los neandertales se debiese al contacto con los humanos modernos, el Auriñaciense tendría que ser más antiguo que el Chatelperroniense. Pero nuestro análisis de las dataciones radiométricas de las secuencias arqueológicas, dejando a un lado los pocos y muy discutibles casos donde



cuarenta en el yacimiento de la Grotte du Renne en Arcy-sur-Cure (cerca de Auxerre) habían proporcionado numerosas hojas de industria lítica, adornos corporales e instrumentos de hueso; había también señales de la existencia de cabañas y de hogares. Todos ellos elementos distintivos del Paleolítico superior. Al principio fue imposible identificar los escasos restos humanos hallados junto a los artefactos, pero el recurso a la tomografía computarizada solucionó el problema. Aplicada a la región oculta del oído interno que se conservaba en un fragmento de cráneo, Hublin pudo establecer que se trataba de un neandertal; fuera de ello, el espécimen no aportaba ninguna información distintiva.

Algunos no tardaron en aducir que los neandertales habían adquirido estos objetos de apariencia moderna a través del robo, de la apropiación de útiles abandonados por humanos modernos o quizá por intercambio. Propuesta rebatida por Francesco d'Errico, de la Universidad de Burdeos, y João Zilhão, del Instituto Portugués de Arqueología. Razonan, por contra, éstos que los instrumentos chatelperronienses de la Grotte du Renne y de otros yacimientos, aunque aparentemente similares a los auriñacienses, reflejan un método de manufactura diferente y más antiguo.

Hoy en día, la mayoría de los investigadores están convencidos de que los neandertales son los autores de los instrumentos y adornos chatelperronienses, si bien se ignora qué produjo semejante salto cultural después de centenares de miles de años. "Es más sencillo aceptar que resulta de la imitación o aculturación con humanos modernos que conceder que los neandertales los inventaron por sí mismos", expone Paul A. Mellars, de la Universidad de Cambridge. "Sería una extraordinaria coincidencia que hubieran inventado ese arsenal de elementos poco antes de que apareciesen los humanos con el mismo tipo de elementos." Además, Mellars no está de acuerdo con la cronología de hechos que presentan d'Errico y Zilhão. "Las dataciones muestran que [los

están intercalados, indica que en los yacimientos donde se presentan ambas culturas, el Chatelperroniense siempre aparece por debajo del Auriñaciense, señal de su mayor antigüedad. No sólo eso. La evaluación del centenar de dataciones disponibles para este período en Europa y el Próximo Oriente, nos muestra que allí donde se conoce perfectamente el contexto arqueológico de los restos datados, la fecha más antigua para el Auriñaciense es de 36.500 años. Esta misma datación radiométrica nos indica que los neandertales se hallaban en plena evolución hacia un comportamiento moderno. En otras palabras, el Chatelperroniense y otras culturas de los últimos neandertales, como son el Uluziense de Italia, aparecieron en Europa hace unos 40.000 años y son anteriores al establecimiento de los humanos modernos en esas mismas regiones.

El desarrollo autónomo incluye la manufactura y el uso de objetos simbólicos, creados para embellecimiento personal; reflejan, además, el reparto de funciones sociales en la cultura neandertal, como podemos comprobarlo en las sociedades primitivas. En consecuencia, el comportamiento "moderno" parece haber surgido en regiones distintas y entre diferentes grupos humanos, lo mismo que aconteció más tarde con la introducción de la agricultura, la escritura y la organización en estados.

De acuerdo con una explicación alternativa, que atiende a la aparición simultánea de adornos personales en muchas partes del Viejo Mundo, los contactos entre humanos modernos y humanos arcaicos produjeron un cambio de la identidad personal, social y biológica, cambio que desembocó en una avalancha creadora de objetos simbólicos. Pero con los datos disponibles preferimos la hipótesis de una invención independiente.

En cualquier caso, la barrera cultural, que parecía separar de los humanos modernos a los neandertales, y que confería a nuestra especie en exclusiva esa cualidad —la capacidad de producir una cultura simbólica— ha quedado reducida a escombros.

JOÃO ZILHÃO es director del Instituto Portugués de Arqueología en Lisboa.

FRANCESCO D'ERRICO es investigador del CNRS en el Instituto de Prehistoria y Geología del Cuaternario de la Universidad de Burdeos.





COLGANTES, INSTRUMENTOS DE HUESO Y CUCHILLOS de la Grotte du Renne. Parecen ser obra de los neandertales. Tales restos, que se hallaron en el yacimiento debajo de creaciones culturales de los humanos modernos, están elaborados siguiendo métodos distintos de los empleados por los humanos modernos, lo que induce a pensar que los neandertales desarrollaron por sí solos una cultura moderna.

neandertales] empezaron a realizar este tipo de objetos sólo tras la llegada de los humanos modernos a Europa oriental, o como mínimo al norte de España", sostiene. (La verdad es que no podemos fechar esos yacimientos con suficiente precisión y, por tanto, caben diversas interpretaciones de los mismos.)

Tras estudiar los adornos corporales de la Grotte du Renne, Randall White, de la Universidad de Nueva York, llega a la conclusión de que reflejan métodos de trabajo empleados, aunque a escala menor, en los adornos del Auriñaciense. Dada la compleja estratigrafía del yacimiento de la Grotte du Renne, no es improbable que estos objetos de apariencia moderna procedan de los niveles superiores auriñacienses. Y lo que reviste para White un interés mayor: el Chatelperroniense no existe más allá de Francia, Bélgica, Italia y el norte de España. Si miramos el Paleolítico superior desde una perspectiva amplia que abarque toda Europa, "el Chatelperroniense es claramente posterior al Auriñaciense".

Ahora bien, que sea posterior al Auriñaciense no significa que surgiera después del contacto con los humanos modernos. En los yacimientos más antiguos del Auriñaciense no hay fósiles humanos; se les atribuye a humanos modernos porque éstos aparecen asociados a los yacimientos auriñacienses posteriores. Pero "quiénes eran biológicamente los auriñacienses de hace entre 40.000 y 35.000 años es una cuestión todavía por resolver", subraya White.

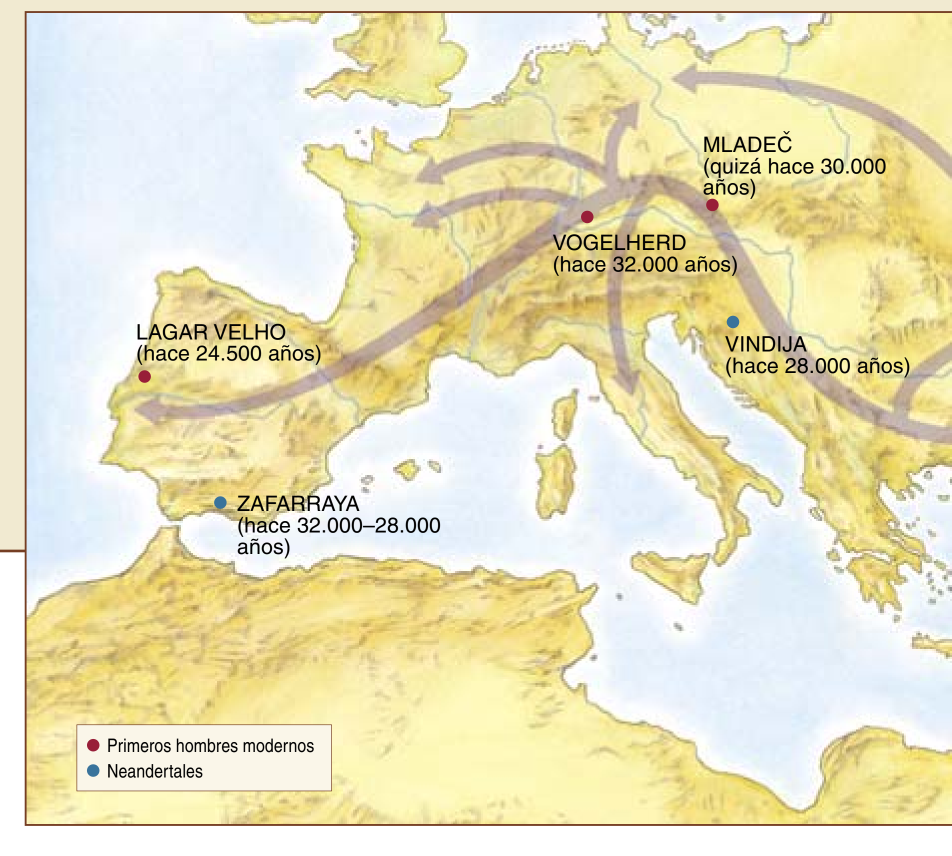
Además, si nos fijamos en el Próximo Oriente de hace 90.000 años, añade la arqueóloga de la universidad neoyorquina, observaremos que los humanos de anatomía moderna y los neandertales creaban el mismo tipo de útiles de industria lítica musteriense; éstos, aunque son menos complejos que las herramientas auriñacienses, requerían también una considerable capa-

El sino de los neandertales por Fred H. Smith

En los últimos años se han multiplicado las pruebas en favor de la hipótesis migratoria del hombre moderno. Habría llegado éste a Europa, probablemente desde el Próximo Oriente, hace entre 40.000 y 30.000 años. La mayoría de los autores creen que las primeras poblaciones de humanos modernos pasaron por la península de Anatolia y los Balcanes, atravesaron luego las llanuras y los valles de Europa central, para extenderse, por último, hacia el norte y oeste de Europa. A su paso, las poblaciones de neandertales se verían sistemáticamente empujadas hasta zonas periféricas y poco atractivas para las poblaciones invasoras de humanos modernos. El último bastión neandertal sería la península Ibérica, de donde proceden fósiles del yacimiento español de Zafarraya datados en hace 32.000 años e instrumentos atribuidos a los neandertales en unos 28.000 años de antigüedad. Para muchos paleoantropólogos, no quedaría en Europa ningún neandertal después de esta fecha. Ni aportaron en absoluto contribución alguna a la biología de los primeros humanos modernos. En ese marco interpretativo, los neandertales fueron abocados a la extinción por una especie humana superior, la nuestra.

Pero nuevas pruebas recabadas en un importante yacimiento del noroeste de Croacia han puesto sordina a más de un punto de esa interpretación tradicional. Con la datación directa por espectrometría de masas por acelerador de dos fósiles neandertales, procedentes de la cueva de Vindija, mis colegas y yo hemos demostrado que los neandertales vivieron, en las mejores condiciones imaginables, en el centro de Europa hace tan sólo 28.000 años. Esta datación, hasta hoy la más reciente para fósiles de neandertales, nos indica que no se les confinó prestamente a la periferia, sino que compitieron con los intrusos humanos modernos durante un largo período.

La coexistencia entre neandertales y primeros humanos modernos durante miles de años, en el corazón de Europa, permitió numerosas oportunidades de interacción mutua. Vindija podría reflejar algunas. El trabajo de mis colegas croatas, Ivor Karavanić, de la Universidad de Zagreb, y Jakov



cidad de elaboración. "No puedo imaginar que los neandertales produjeran estos instrumentos de técnica avanzada y los transmitiesen de generación en generación sin poseer un lenguaje", apostilla White. "He visto mucha gente realizando este tipo de objetos; no basta observar por encima del hombro de quien los ejecuta para aprender el arte, sin mediar un diálogo." Para White y otros no merece ningún crédito la tesis de la superioridad cognitiva de los humanos modernos, en particular si la inferioridad de los neandertales comporta que carecían de lenguaje. Sí parece más fundado que los humanos modernos crearan un tipo de cultura con mayor dependencia de materiales simbólicos.

Se recurre también a la morfología del cerebro neandertal en busca de indicios sobre su capacidad cognitiva. Para Ralph L. Holloway, de la Universidad de Columbia, las asimetrías cerebrales que caracterizan a la humanidad actual pueden observarse ya en los neandertales. "De momento, es imposible distinguir entre ambos", afirma. Sobre si la anatomía de los neandertales les capacitaría para hablar, los estudios de la base del cráneo realizados por Jeffrey T. Laitman, de la Facultad de Medicina Mount Sinai, sugieren lo siguiente: si los neandertales hablaron, tuvieron un repertorio fonético más limitado. Sin embargo, no está claro cuál es el significado de estas limitaciones físicas.

Su desaparición

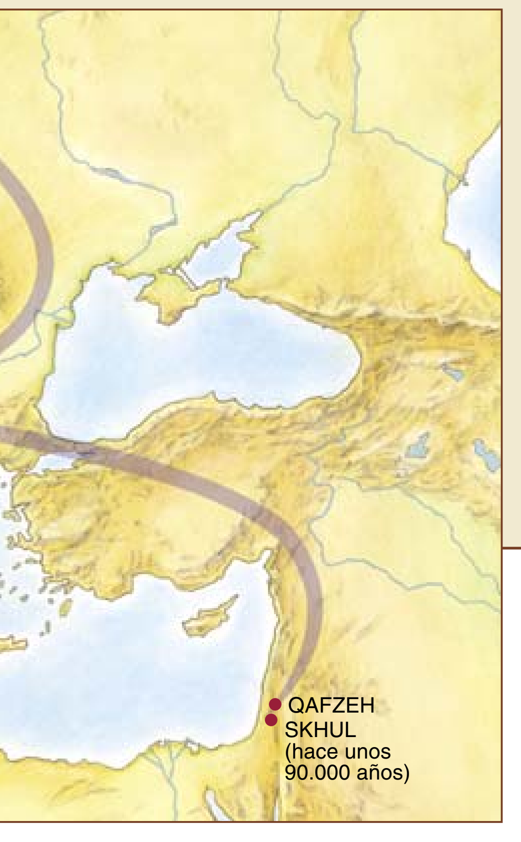
Si los neandertales gozaron de aproximadamente las mismas capacidades cognitivas que los humanos modernos, su desaparición se torna entonces más incomprensible. Las nuevas dataciones de los restos neandertales de la cueva croata de Vindija hacen hincapié en que su extinción no se produjo de la noche a la mañana. El grupo liderado por Smith ha demostrado que los neandertales vivieron en Europa central hasta hace 28.000 años, varios miles después de la expansión de los humanos modernos por Europa. Apoyado en esto, Stringer defiende que los humanos modernos, una nueva especie a su entender, reemplazaron a los neandertales a lo largo

Radovčić, del Museo de Historia Natural de Croacia, ha sacado a la luz una mezcla de útiles musterienses y auriñacienses en el mismo nivel estratigráfico de donde proceden los fósiles de neandertales datados. Su hallazgo nos revela que los neandertales fabricaban herramientas avanzadas o las obtenían por transacción con los humanos modernos. Si atendemos a la morfología, los de Vindija muestran una apariencia más moderna que la mayoría de los neandertales, lo que sugiere que sus antepasados se cruzaron con los humanos modernos.

La probabilidad de un flujo genético entre ambos grupos se apoya también en la huella que los neandertales dejaron en los primeros humanos modernos de Europa. Los fósiles de adultos pertenecientes a los primeros humanos modernos de yacimientos como Vogelherd, en el sudoeste de Alemania, y Mladeč, en Moravia (República Checa), presentan rasgos que hallan difícil explicación si no se acepta la participación neandertal en sus antepasados. Demos un ejemplo. Neandertales y humanos modernos exhiben, en su gran mayoría, una proyección de la parte posterior del cráneo, el "moño" occipital (algunos aspectos, como la forma y posición de esta prominencia, difieren entre ellos porque la forma general del cráneo es distinta). Pero los fósiles procedentes de los yacimientos de Skhul y Qafzeh, en el Próximo Oriente, y que presumiblemente representan los antepasados de los primeros humanos modernos europeos, no tienen esta morfología. No resulta fácil explicar que la causa responsable del desarrollo de esta prominencia puede aparecer independientemente y de forma ubicua en los primeros humanos modernos de Europa. Es harto más lógico aceptar que ese rasgo morfológico denuncia una relación con los neandertales. El niño portugués, descubierto recientemente, nos ofrece más pistas interesantes.

Las pruebas muestran que las interacciones culturales y biológicas entre neandertales y primeros humanos modernos fueron muy complejas, demasiado para atribuir el origen de los humanos modernos a la completa sustitución biológica de los neandertales. Los neandertales, en cuanto grupo, han dejado de existir; mas sus genes, quizá borrados para siempre, participaron en los inicios de la historia biológica de los humanos modernos europeos.

FRED H. SMITH es catedrático del departamento de antropología de la Universidad de Northern Illinois.



LA MIGRACION de los humanos modernos (*violeta*) en Europa no eliminó completamente a los neandertales, que continuaron viviendo en Europa central y occidental hasta hace 28.000 años. Algunos fósiles de los primeros humanos modernos europeos poseen rasgos neandertales, lo que sugiere que durante el largo período de convivencia las dos poblaciones se mezclaron.

de un proceso dilatado y lento. "Los neandertales fueron desapareciendo de forma gradual porque los humanos modernos eran ligeramente más innovadores, estaban algo mejor capacitados para afrontar los rápidos cambios ambientales y probablemente habían desarrollado un tejido social más sólido", resume.

Por otro lado, si los neandertales eran una variación de nuestra propia especie con las mismas capacidades, tal y como creen Smith y Wolpoff, el largo período de coexistencia de los neandertales y de las nuevas poblaciones que colonizaban Europa proporcionó tiempo suficiente para mezclarse. Ahí se escondería la causa de la morfología mixta que se aprecia en los últimos neandertales y en los primeros humanos modernos de Europa. Y si hubo intercambio genético, entra dentro de lo verosímil que se intercambiasen elementos culturales, lo que explicaría las semejanzas entre Chatelperroniense y Auriñaciense. Según Wolpoff, los neandertales, en cuanto entidad distinta, desaparecieron al ser superados numéricamente por los recién llegados. Miles de años de cruzamiento entre la restringida población neandertal y los humanos modernos, muchos más, diluyeron los rasgos distintivos de los neandertales, que terminaron por extinguirse.

"Si dentro de miles de años pudiésemos observar a los australianos, veríamos que predominan los rasgos europeos (en detrimento de los genuinamente australianos), por la sencilla razón de una mayor población blanca", señala Wolpoff. "No se debería ni a una mejor adaptación, ni a una cultura diferente ni a ningún otro motivo fuera del numérico. Lisa y llanamente, hay muchos más europeos. En mi opinión, eso sirve para describir lo que observamos en Europa: el predominio de una población más numerosa."

De la diversidad de opiniones en torno a temas tan controvertidos surge un punto compartido. El rechazo unánime de la vieja tesis de unos neandertales con andares pesados y carentes de cultura. Otra cuestión irresuelta es la de si fueron nuestros antepasados o sólo una especie afín, que compitió con nosotros por el territorio eurasiático y perdió a la postre. En cualquier caso, los detalles son de una complejidad endiablada. "A medida que avanzamos en el conocimiento, surgen nuevos interrogantes, y el problema se enreda", confiesa Lawrence G. Strauss, de la Universidad de Nuevo México. "No hay explicaciones sencillas que sean definitivas."

Shawn Carlson

Calor extremo

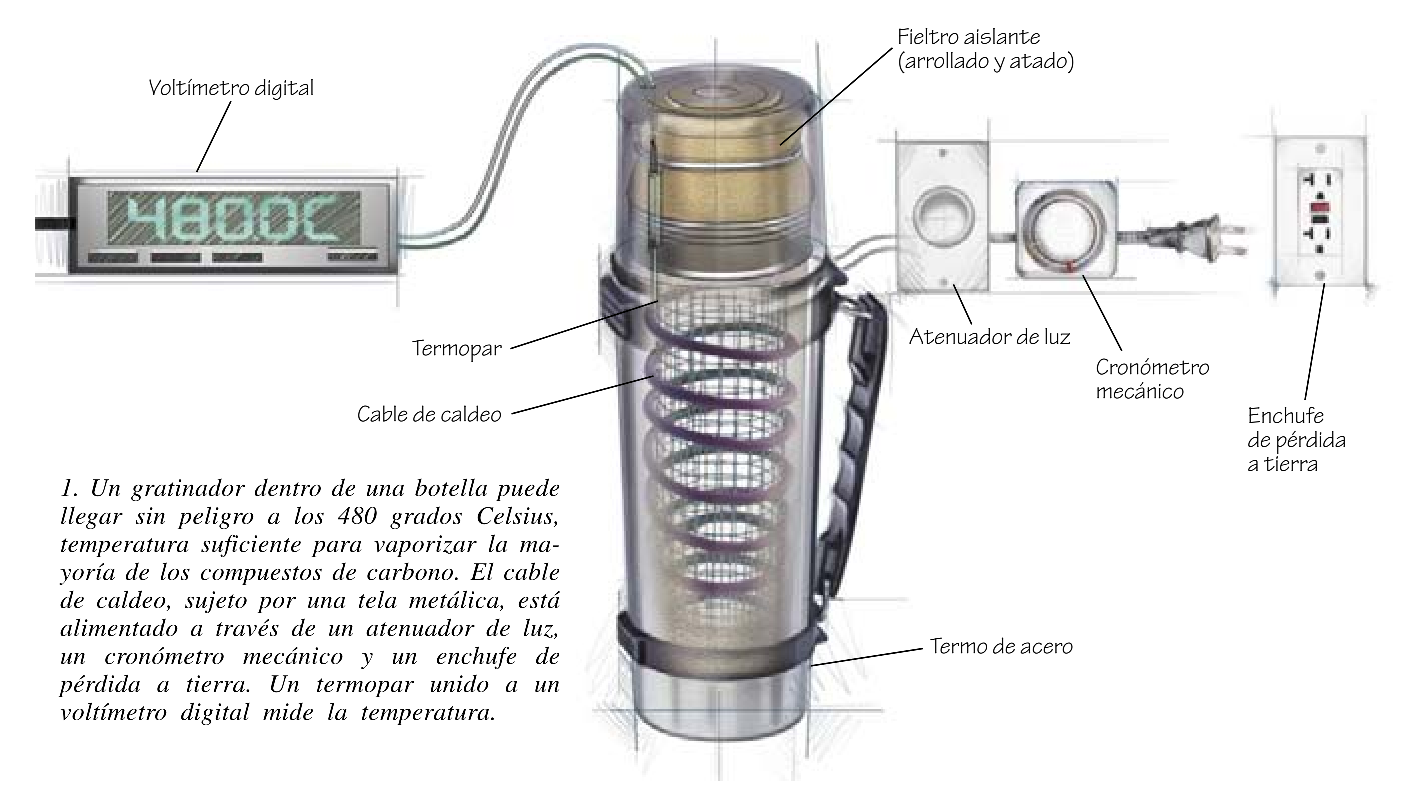
Ajustado a su temperatura máxima de unos 260 grados Celsius, un horno de cocina reduce enseguida un jugoso filete de ternera a un ascua de crujiente carbono. Lo sé por triste experiencia. Pero el calor de los hornos ordinarios no suele bastar para muchas actividades investigadoras. Un ejemplo es la medición del contenido orgánico de los suelos. Los terrenos fértiles contienen nutrientes bioquímicos y microbianos imprescindibles para la vida de las plantas superiores. Para averiguar la riqueza orgánica de un suelo hay que pesar una muestra, eliminar los contenidos orgánicos y volver a pesarla. El único modo que conozco para eliminar toda la materia orgánica es hornear la muestra a gran temperatura. Aproximadamente a los 450 grados Celsius, las sustancias orgánicas se degradan en sus constituyentes y el carbono se enlaza con el oxígeno atmosférico para crear monóxido de carbono y anhídrido carbónico. El residuo carbonizado se evapora y la muestra edáfica se queda desprovista de todo atributo vital.

El mismo proceso que expulsa la materia orgánica de la muestra sirve para eliminarla de las superficies de vidrio; para limpiar la cristalería de laboratorio más intrincada podemos, pues, emplear un horno que se acerque a los 500 ºC. Análogamente, al hornear sorbentes a esa temperatura se expulsan los contaminantes químicos y los recarga para reutilizarlos, por ejemplo, en bombas creadoras de vacíos de gran calidad. Nuestro horno tendría otras aplicaciones: fusión de esmaltes, activación de cuentas de vidrio para separadores químicos, recocer vidrios y metales y abrir orificios de paso en recipientes de vidrio de laboratorio.

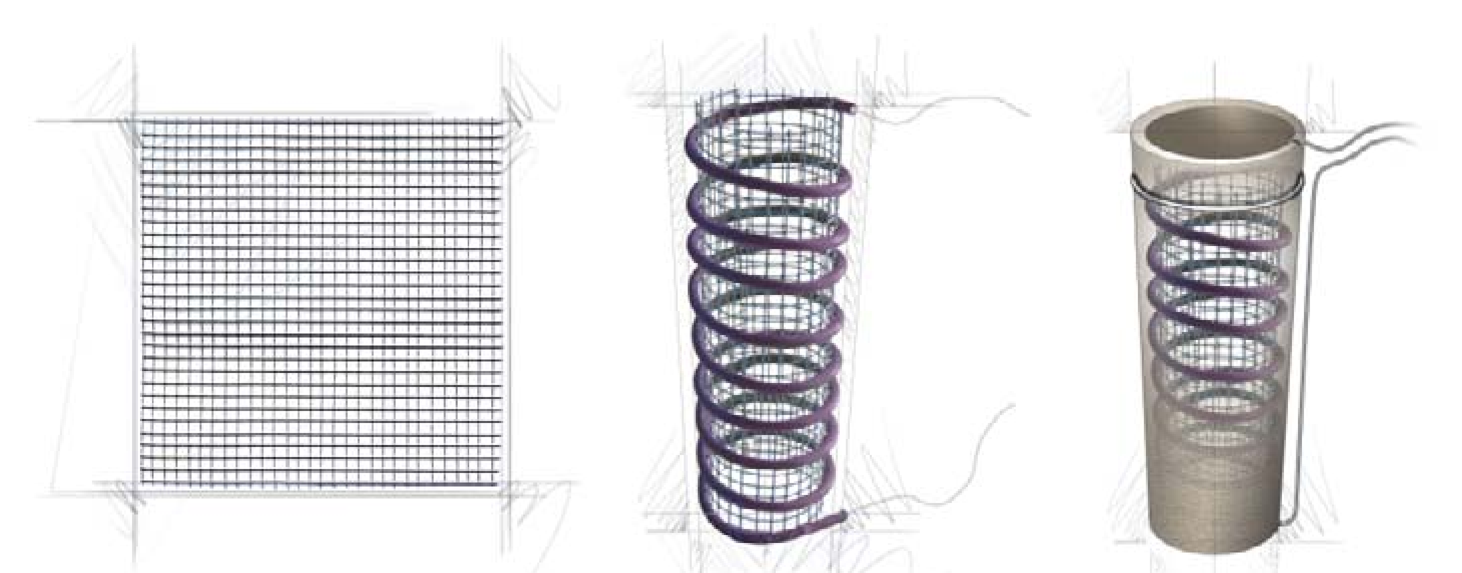
Se comprenderá por qué me emocionó saber que Roger Daschle, músico de talento y compañero de excursiones, había desarrollado un pequeño horno que puede emplearse sin peligro a esas temperaturas. Consume unos escasos 80 watt, se calienta en menos de una hora y puede construirse sin agotar los ahorrillos.

Roger y yo pertenecemos a un conjunto informal de iconoclastas ensimismados que todos los viernes nos vamos de excursión, huyendo del despacho, para hablar de la profesión. Su ingeniosa innovación se le ocurrió al servir una taza de chocolate caliente durante una pausa en nuestras discusiones sobre la teoría del caos y los detectores de infrarrojos de factura casera. Deseaba Roger construir un horno muy robusto como accesorio de un pequeño separador químico que estaba proyectando. Al verter en la taza el cacao procedente del termo y ver el vapor que se elevaba en el frío aire de la tarde, se dio cuenta de que había dado con el recipiente perfecto. Un termo es barato y su masa térmica, despreciable. Sabía que, si lograba sujetar un calefactor eléctrico de alta temperatura dentro de un termo adecuado y cerrar la boca de éste con un aislante, habría conseguido un horno de sobremesa operativo y eficiente.

Roger hizo alarde de su invento en nuestra siguiente excursión. Había comprado un termo de boca ancha (del tipo empleado para sopas). Conviene asegurarse de que la botella de vacío sea de acero y no de vidrio, que podría romperse, ni de aluminio,



1. Un gratinador dentro de una botella puede llegar sin peligro a los 480 grados Celsius, temperatura suficiente para vaporizar la mayoría de los compuestos de carbono. El cable de caldeo, sujeto por una tela metálica, está alimentado a través de un atenuador de luz, un cronómetro mecánico y un enchufe de pérdida a tierra. Un termopar unido a un voltímetro digital mide la temperatura.



2. Un tamiz de tela metálica se dobla al tamaño del interior de un termo...

...en cuyo entorno se arrolla luego el cable de caldeo...

...para después encerrarlo en fiberfrax aislante o guarnición de silenciador de escape

que podría perder el temple e implosionar. Roger cocinó su invento con un calefactor de cable: un haz de alambres de nicromo arrollados alrededor de un núcleo aislante y encerrados en una cubierta también aislante. Esos cables funcionan con las tomas de pared y son mucho menos peligrosos que los conductores desnudos. Omega Engineering los vende en trozos de 90 cm por 22 dólares (www.omega.com, nº de pieza FGR-030). La temperatura de funcionamiento del cable es de 480 ºC y ésta impone la temperatura de seguridad de funcionamiento dentro del horno. Si pasa más corriente, el instrumento se calentará mucho más. La corriente puede mantenerse en un valor no peligroso intercalando un atenuador de luz casero y observando la temperatura. En precaución, intercaló un cronómetro mecánico de una hora para asegurarse de que la instalación no se quedara accidentalmente funcionando sola.

Para instalar el calefactor en el termo, construyó un cilindro con un trozo de malla de acero poco tupida, que puede comprarse en cualquier ferretería bien provista. Sobre ese cilindro arrolló sin apretar el cable de caldeo y revistió el conjunto con una capa de un centímetro de grueso de fiberfrax, un material similar a una tela hecha de fibras de alúmina hiladas. Una guarnición de tubo de escape, que puede adquirirse en una tienda de recambios, sirve también. El conjunto completo se ajusta dentro del termo a través de la boca abierta. Por último, Roger arrolló apretadamente una banda de fiberfrax sobre un tapón que encajaba en la boca del termo. Una sola vuelta de alambre de acero alrededor del tapón impide que éste se deshaga.

Un termopar del tipo K, que genera una tensión eléctrica proporcional a la temperatura, proporciona el modo más económico de medir la temperatura. La tensión puede leerse en un voltímetro digital dotado de los circuitos internos capaces de interpretar ese sensor. Si no, puede estimarse la temperatura leyendo la tensión desarrollada entre los conductores con un voltímetro digital. La temperatura aproximada en grados Celsius se obtiene multiplicando por 27,7 la tensión en milivolts. Comprobé el horno de Roger con un termopar de conductor desnudo de Omega Engineering (nº de pieza CHAL-015). Lo aislé con un trozo de manguito de nextel (nº de pieza XC4-116, Omega) y coloqué el sensor junto a la parte superior del horno. Con 480 ºC en el interior, el exterior se calentaba de forma molesta al tacto, pero podía tocarse. Cuando, a modo de prueba de seguridad, subí la temperatura hasta 600 ºC valiéndome de una cinta calefactora de alta temperatura, el calor impedía tocar la carcasa exterior.

Por ello hay que asegurarse el control de temperatura en todo momento y mantenerle como máximo a 480 ºC. Déjese lejos de la curiosidad de los niños y de los animales domésticos. Intercálese un interruptor temporizador y conéctese el calefactor a través de un interruptor de pérdida a tierra, como los que se instalan en las tomas de pared de los cuartos de baño. Esos interruptores contienen un dispositivo interno que se dispara cuando hay un cortocircuito. Si el horno se recalentase y se cortocircuitase, se cortaría la corriente.

Con nuestro horno puede medirse el contenido orgánico de la tierra. Primero, se pesan esmeradamente unos 100 gramos de barro procedente de nuestro jardín y se seca durante una hora en el horno de la cocina a 120 ºC. Luego volvemos a pesar. La tierra de mi jardín resultó contener del orden del 33,2 por ciento de agua en peso. Esa tierra seca se envuelve herméticamente en pan de aluminio y se cuece en el horno-termo durante dos horas a 480 ºC. Al carbonizarse, las materias orgánicas desprenden unas horrendas vaharadas de humo apestoso, por lo que debe emplearse una campana de humos o mantener el aparato al aire libre. Una pesada final reveló que el barro de mi jardín tiene un 8,6 por ciento (en peso seco) de materia orgánica. La arena de un campo de juegos cercano dio un peso del 3,2 por ciento de agua y un escuálido 0,7 por ciento de materia orgánica (en peso seco).

Sería interesante controlar continuamente el peso, al objeto de buscar los procesos físicos que tienen lugar a las distintas temperaturas.

Como servicio a los aficionados, la Society for Amateur Scientists proporciona aislante de fiberfrax en cantidad suficiente para este proyecto (hasta abril del 2001). Su precio es de 5 dólares, más otros 5 para envíos al extranjero. Sobre este y otros proyectos aparecidos en la sección, visítese la página Web de la Society for Amateur Scientists en sas.org. Puede escribirse a la sociedad a 4735 Clairemont Square, PMB 179, San Diego, CA 92117, o llamar al 619-239.88.07.

Ian Stewart

Ciertos problemas son demasiado grandes para intentar resolverlos por tanteos

En su libro *Amusements in Mathematics*, publicado en 1917, Henry Ernest Dudeney proponía un imaginativo problema inspirado en la batalla de Hastings, la célebre confrontación entre los sajones, mandados por el rey Harold, y los normandos, conducidos por Guillermo el Conquistador. Según Dudeney, una antigua crónica de la batalla afirmaba: "Los hombres de Harold permanecieron bien juntos, como era su costumbre, y formaron en sesenta y un cuadrados, con igual número de hombres en cada uno de ellos... Cuando el propio Harold se sumó a la refriega, los sajones constituían un poderoso cuadrado humano." ¿Cuál pudo ser el número mínimo de hombres del ejército del rey Harold?

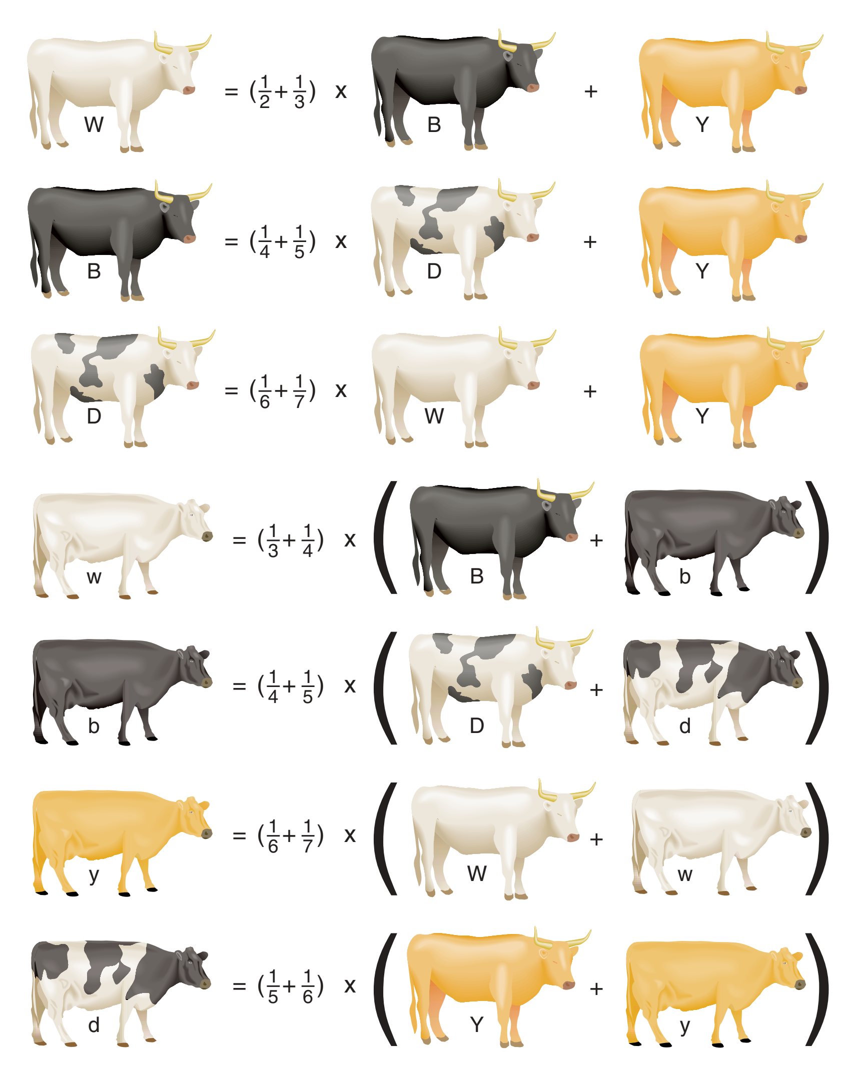
Matemáticamente, deseamos hallar un cuadrado perfecto que multiplicado por 61 e incrementado en una unidad, engendre otro cuadrado perfecto. Es decir, deseamos hallar soluciones enteras de la ecuación $y^2 = 61x^2 + 1$. Se trata de un ejemplo de la ecuación de Pell, erróneamente atribuida a un oscuro matemático inglés del siglo XVII. Las ecuaciones de esta categoría general —en las que podemos reemplazar 61 por cualquier entero positivo que no sea un cuadrado— tienen siempre infinitas soluciones. Para calcular las soluciones se utilizan las fracciones continuas.

Como ejercicio preliminar, tomemos la batalla de Brighton, donde los hombres de Harold formaron 11 cuadrados, subsistiendo iguales las restantes condiciones. La ecuación es ahora $y^2 = 11x^2 + 1$ Unos cuantos tanteos revelan la solución mínima: $x = 3$, $y = 10$.

No bastará ir tanteando para resolver el problema de Dudeney porque la solución mínima es $x = 226.153.980$, $y = 1.766.319.049$. Las soluciones de la ecuación de Pell $y^2 = Dx^2 + 1$ varían enormemente con el coeficiente D, el entero positivo que no debe ser cuadrado. Los valores "difíciles" de D menores que 100 (es decir, los que proporcionan para x soluciones mayores que 1000) son D = 29, 46, 53, 58, 61, 67, 73, 76, 85, 86, 89, 93, 94 y 97. El valor más difícil es, con mucho, el 61. Con un poco de esfuerzo los lectores podrían averiguar lo que ocurre en los casos D = 60 y D = 62, valores contiguos al 61 por cada lado, que fue la sagaz elección de Dudeney (las soluciones, al final del artículo).

Dudeney pudo haber propuesto un problema mucho más difícil: si se toma D = 1597, las soluciones mínimas para x e y son, aproximadamente, $1{,}3 \times 10^{46}$ y $5{,}2 \times 10^{47}$. Y el caso D = 9781 es todavía más difícil.

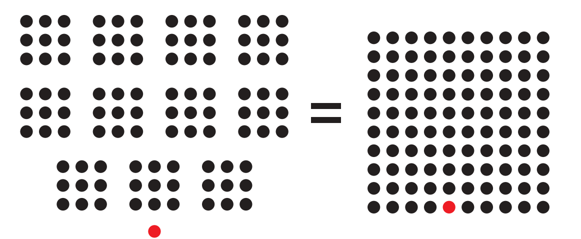
También la ecuación de Pell nos ayuda a resolver la resolución de un problema mucho más famoso, el de "las vacas del Sol". En 1773, Gotthold Ephraim Lessing descubrió un manuscrito donde figuraba el problema, enunciado en verso: 22 pareados elegíacos atribuidos a Arquímedes que habría enviado en una carta a Eratóstenes, director de la biblioteca de Alejandría. La carta empieza, "¡Oh, extranjero! Si eres diligente y sabio, calcula el número de las reses del Sol, que en tiempos



En el problema de la vacada del Sol, los números de toros y de vacas de cada color están determinados, en parte, por estas siete ecuaciones

pastaron en los campos de la isla trinacia de Sicilia."

Las vacas del Sol se mencionan en *La Odisea* de Homero. En el poema homérico decíase que eran 350, pero Arquímedes tenía en su mente un número mucho mayor. En su planteamiento del problema, la manada está dividida en toros blancos (W), toros negros (B), toros amarillos (Y) y toros manchados (D), amén de las correspondientes variedades de vacas (w, b, y, d). El número de cabezas está especificado mediante siete condiciones sencillas de satisfacer, más otras dos, difíciles éstas. Las condiciones sencillas son expresables mediante siete ecuaciones que ponen en relación las ocho variables. La primera condición difícil es que el número total de toros blancos o negros (W + B) ha de ser un cuadrado perfecto. La segunda estipula que el número total de toros amarillos o manchados (Y + D) tiene que ser un número triangular, o sea, ha de ser igual a una suma de la forma $1 + 2 + 3 + ... + m$, donde m es un entero positivo.



Solución mínima: Un ejército de 99 soldados (puntos negros) *más el rey Harold* (punto rojo) *puede ser dispuestos en 11 cuadrados al mando de Harold* (izquierda) *o en un cuadrado grande que contiene a Harold* (derecha)

Las siete primeras condiciones se condensan en un único hecho: las ocho incógnitas son proporcionales unas a otras en razones fijas. Al desenmarañar las ecuaciones, hallamos que las soluciones son:

$W = 10.366.482n$, $B = 7.460.514n$,
$Y = 4.149.387n$, $D = 7.358.060n$,
$w = 7.206.360n$, $b = 4.893.246n$,
$y = 5.439.213n$, $d = 3.515.820n$

siendo n un entero positivo cualquiera.

El problema consiste ahora en hallar el valor mínimo de n que satisface las dos condiciones difíciles. En 1830, J. F. Wurm resolvió una variante más sencilla del problema, que prescindía del requisito de que W + B fuese cuadrado perfecto. La condición de que Y + D sea un número triangular se traduce, tras un poco de cálculo algebraico, en la condición de que $92.059.576n + 1$ sea un cuadrado. Al insertar en las ecuaciones el valor mínimo de n que satisface este requisito, el número total de cabezas resulta ser de sólo 5.916.837.175.686.

La ecuación de Wurm, sin embargo, admite infinitas soluciones para n, y entre ellas podemos buscar la mínima que verifique también la condición de que W + B sea un cuadrado. Otro matemático alemán, A. Amthor, demostró en 1880 que n tiene que ser igual a $4.456.749m^2$, donde m satisface una ecuación de Pell: $410.286.423.278.424m^2 + 1$ = un cuadrado perfecto. Se puede utilizar ahora el método de fracciones continuas para hallar el mínimo de tales valores de m. Los cálculos eran inabordables para Amthor, quien sí pudo determinar que el tamaño de la manada venía dado por un número de 206.545 dígitos, y consiguió identificar los cuatro primeros. Entre 1889 y 1893 el Club de Matemáticas de Hillsboro calculó los primeros 32 dígitos, 30 de los cuales han resultado ser correctos. Matemáticos de la Universidad de Waterloo determinaron en 1965 la primera solución completa. La lista completa de los 206.545 dígitos fue publicada en 1981 por Harry L. Nelson. Utilizó un superordenador CRAY-1; el cómputo duró 10 minutos.

En nuestros días, sin embargo, los matemáticos disponen de ordenadores ultraveloces, capaces de efectuar en un abrir y cerrar de ojos cálculos aritméticos con números de hasta cientos de miles de dígitos. Ilan Vardi observó que el programa Mathematica era capaz de rehacer todo el análisis anterior en unos pocos segundos. Llevó las cosas un poco más lejos y descubrió que Mathematica era también capaz de producir una fórmula exacta para el tamaño de la manada; hasta entonces, los matemáticos no habían sospechado la existencia de tal fórmula. El cómputo exigió hora y media de trabajo en una estación Sun. Los detalles están descritos en el artículo de Vardi "Archimedes' Cattle Problem," en el *American Mathematical Monthly* de abril de 1998. El resultado de todo esto es que el número total de cabezas es el mínimo número entero que supere el valor $(p/q)(a + b\sqrt{4.729.494})^{4658}$, donde

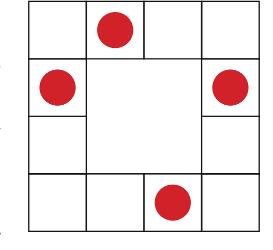
$p = 25.194.541$
$q = 184.119.152$
$a = 109.931.986.732.829.734.979.866.232.821.433.543.901.088.049$
$b = 50.549.485.234.315.033.074.477.819.735.540.408.986.340$

No parece que Arquímedes pudiera resolver el problema: es demasiado grande. ¿Conoció la existencia de solución? Probablemente no. Arquímedes era lo bastante sagaz para comprender la necesidad de algún tipo de ecuación, pero parece inverosímil que pudiera saber que tal ecuación habría de poseer solución. Desconfiad de los griegos que os regalan problemas.

SOLUCIONES: Para D = 60, $x = 4$, $y = 31$
Para D = 62, $x = 8$, $y = 63$

Acuse de recibo

En respuesta a "Destellos sincrónicos de las luciérnagas" [mayo de 1999] Cindy Eisner ha efectuado un análisis exhaustivo de todos los tableros de tamaño moderado, hallando en cada caso el grupo máximo de luciérnagas para el cual ningún par llega a la convergencia y el número de estados que nunca llegan a una sincronización. Por ejemplo, en un tablero de 4×4, el grupo máximo de luciérnagas en el que ningún par llega a ser convergente contiene cuatro luciérnagas, con posiciones iniciales 1, 4, 7 y 11 (*abajo*). En un tablero de 15×15, el máximo grupo de luciérnagas no convergentes contiene 15, con posiciones iniciales 0, 4, 6, 8, 11, 13, 17, 21, 24, 27, 31, 37, 41, 46 y 51. En este tablero existen 124.523 estados iniciales que nunca desembocan en sincronización, de un total de $7,20576 \times 10^{16}$ posibilidades.



Además, en tableros de dimensión arbitraria, para dos luciérnagas existen siempre estados iniciales que garantizan la no convergencia. Por ejemplo, en un tablero de $n \times n$, situándolas en las posiciones 0 y $2n - 3$. Eisner sospecha que tales estados son los únicos que no ocasionan sincronismo en el caso de dos luciérnagas.

—I.S.

IDEAS APLICADAS

Louis A. Bloomfield

Agentes limpiadores

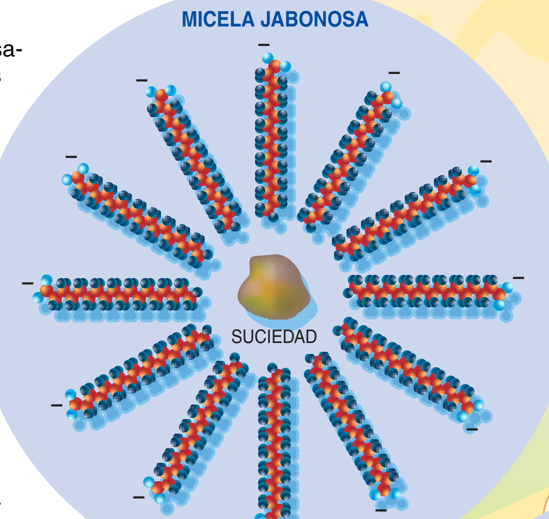
El lavado de ropas, platos y cabellos sería muy fácil si el agua disolviera todo tipo de suciedad y toda clase de manchas. Bastaría un simple enjuague. Pero los disolventes como el agua son unos líquidos remilgados que disuelven mejor unas sustancias que otras. Cuestión de atracción: si las moléculas del solvente se atraen entre sí con más fuerza que la fuerza con que las atraen las moléculas de suciedad, difícilmente la disolverán. Por desgracia, muchos de los tipos de suciedad que se desean eliminar no se adhieren bien al agua.

El agua es un disolvente excelente de las sustancias polares, incluidas las sales, que se disocian en iones eléctricamente cargados, o azúcares, que poseen regiones cargadas. La misma molécula de agua es polar, con átomos de hidrógeno ligeramente positivos y un átomo de oxígeno ligeramente negativo. Cuando las moléculas de agua se encuentran con una molécula de suciedad polar, la atracción electrostática hace que la atrapen y se la lleven consigo. Pero las sustancias no polares, tales como grasas y aceites, carecen de regiones polares que atraigan al agua. Esas suciedades pueden disolverse en solventes no polares, percloroetileno y nafta entre ellos, pero se trata de compuestos nocivos y contaminantes.

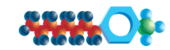
Y aquí está lo interesante de jabones y detergentes. Sus moléculas tienen un extremo polar y un extremo no polar; se encuentran en su elemento lo mismo en un medio polar que en otro no polar. En el agua, esas moléculas forman micelas, diminutas estructuras esféricas, con sus extremos polares hacia afuera y sus extremos no polares hacia adentro. Los interiores no polares de las micelas disuelven las moléculas oleosas; por eso, cuando lavamos con agua jabonosa, las micelas capturan las moléculas no polares y las arrastran consigo.

Jabones

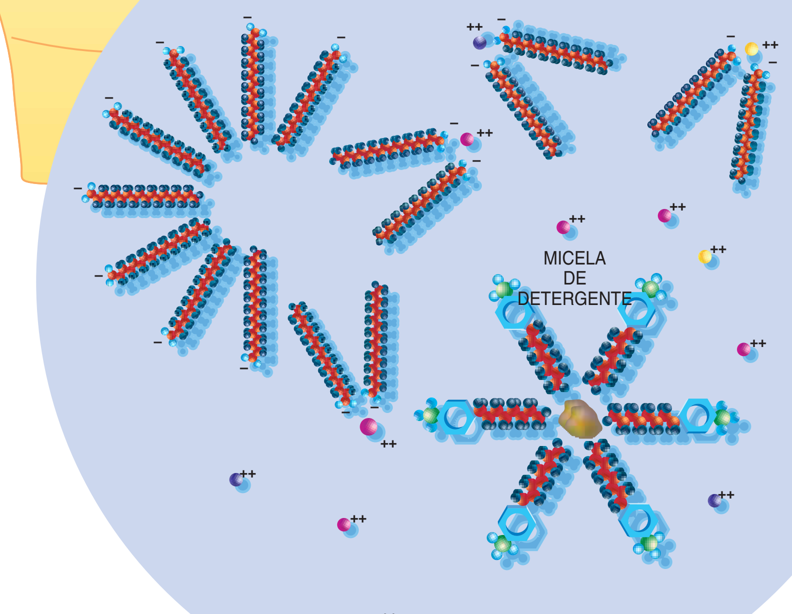
En su mayoría los jabones son sales derivadas de lípidos o aceites compuestos de iones sodio, de carga positiva, y cadenas moleculares de carga negativa. Cada carga iónica negativa ocupa un extremo, donde su cadena hidrocarbonada no polar acaba en un grupo carboxílico polar. Al añadir jabón al agua, sus iones sódicos se disuelven y las cadenas, dotadas ahora de carga negativa, forman micelas. Esas cadenas recubren las moléculas de agua, reduciendo así su tensión superficial y facilitando su penetración en los tejidos.



Detergentes

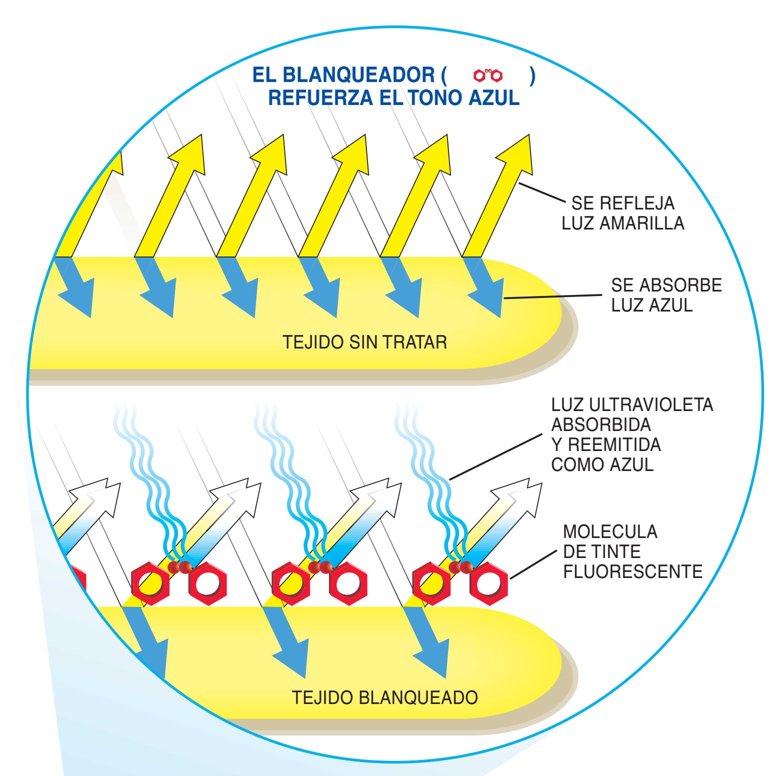


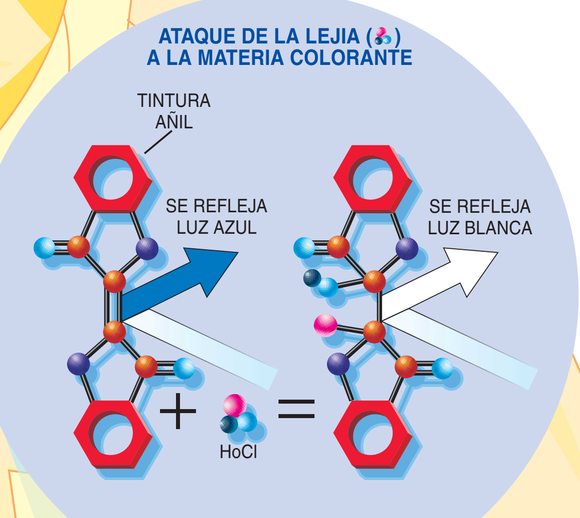
Por desgracia, el jabón da mal resultado en agua dura. Los iones calcio, magnesio y hierro, de carga positiva, contenidos en el agua dura se adhieren al extremo de carga negativa, impidiendo la formación de micelas. Con los detergentes sí podemos lavar con agua dura, gracias a los grupos sintéticos polares, tales como sulfonatos o etoxisulfonatos, unidos a sus cadenas hidrocarbonadas. Aunque esos grupos sintéticos portan una carga negativa, su atracción hacia los iones del agua dura es débil y, por ello, conservan su cualidad limpiadora.



Lejías

Las manchas de tinta y otras parecidas se fijan tanto, que no pueden disolverse. Hay que destruirlas. Sus colores suelen estar asociados con electrones de enlace débil, como los que intervienen en los enlaces atómicos dobles. Las lejías atacan esos electrones vulnerables y hacen uso de átomos expulsores de electrones (oxidantes), tales como los de oxígeno o cloro, para llevárselos: de ese modo las moléculas de la mancha se hacen incoloras e invisibles.





Blanqueadores

Al envejecer, los tejidos blancos adquieren un tono amarillento, pues empiezan a absorber luz del extremo azul del espectro en vez de reflejarla. Para reponer esa luz azul “desaparecida”, a muchos detergentes se añaden blanqueadores. Estos tintes fluorescentes absorben la luz ultravioleta, que es invisible, y emplean su energía para emitir luz azul. Ese azul extra oculta el amarilleo del tejido. Expuesto a la luz solar, un tejido blanqueado presenta una intensa luminosidad azulada con una blancura brillante. Tan habituados estamos a esa luminosidad que casi todos los tejidos blancos se pretiñen con blanqueadores.

LOUIS A. BLOOMFIELD es profesor de física en la Universidad de Virginia y autor de *How Things Work: The Physics of Everyday Life.*

¿Sabía ud...?

● Húmedos, el cabello y numerosos tejidos adquieren una carga débilmente negativa. Esa carga repele el jabón dotado de carga negativa y las micelas de detergente e impide que ambos redepositen las moléculas de suciedad grasa. Pero los iones de la mayoría de los acondicionadores y suavizantes de tejidos poseen unos extremos positivamente cargados que los atrae hacia el cabello y el tejido, haciendo que se queden allí mientras se evapora el agua. Seguidamente liberan sus moléculas suavizadoras o hidratantes.

● Es difícil combinar champú y acondicionador en una mismo frasco porque los iones negativamente cargados del champú y los iones positivamente cargados del acondicionador se interfieren. Los productos para limpiar cabello que contienen ambos ingredientes encierran las moléculas del acondicionador en vainas o complejos cristalinos que no se abren hasta quedar expuestos a agua abundante. Así, las moléculas del acondicionador permanecen confinadas mientras nos enjabonamos y se liberan al enjuagarnos.

● Muchas fibras contienen grupos químicos polares a los que las moléculas de agua se adhieren intensamente, haciendo que se hinchen y estiren al humedecerse. Al secarse, las fibras recuperan su tamaño de partida pero no su forma original. El resultado es que la prenda se deforma. Para evitarlo, los tejidos pueden limpiarse en seco con solventes no polares, aunque tóxicos, como el percloroetileno. Los detergentes que se añaden a esos solventes forman micelas inversas que pueden disolver la suciedad polar.

James Burke

Música acuática



Hace poco, me encontraba en el baño de un hotel destrozando mi aria favorita, como tengo costumbre, cuando se me ocurrió pensar si alguna vez Enrico Caruso haría lo mismo. El mayor tenor de principios del siglo XX (y el mejor pagado) se pasó la mayor parte de su vida en hoteles. En 1908 compartió el Hotel Savoy de Nueva York con el nuevo director de la Opera Metropolitana, Gustav Mahler. Estos dos enormes ególatras congeniaron bastante bien, probablemente porque la desgracia gusta de la compañía. La amante de Caruso acababa de fugarse con el chófer y la vida conyugal de Mahler necesitaba un hilo conductor.

Mahler procedía de Viena, ciudad de la que huía por los ataques antisemitas en la prensa, pero también porque el difícil maestro empezaba a tener demasiados altercados con los administradores de la ópera. Y eso a pesar de ser el protegido de una B con mayúsculas. Bueno, una de las tres B con mayúsculas, tal como se les conocía por entonces: Beethoven, Bach y Brahms (padrino musical de Mahler). Tengo que confesar aquí una predilección. Hace ya tiempo, cuando tocaba el clarinete, en mi primera (¡y última!) actuación en público como instrumentista a los 17 años ejecuté el quinteto para clarinete de Brahms. Remontándonos a finales del siglo XIX, aunque algunos tipos locos y algo prusianos que manejaban un material de auténtica vanguardia, como Wagner y Liszt, lo encontraban un poco pasado de moda, el mundo musical de la época secundaba, casi sin excepción, al gran B.

Y entre ellos, un simpático doctor que lo hizo literalmente. Theodor Billroth tocaba el segundo violín en su grupo de música de Viena, en el que Brahms se dejaba caer de vez en cuando. (Andando el tiempo Brahms incluso le dedicaría un par de sonatas.) Billroth fue capaz de digerir esta posición de admirador y fiel al maestro porque tenía la mano rota con el escalpelo, hasta el punto de que se le conoce como el padre de la cirugía abdominal. También fue uno de los primeros cirujanos europeos en introducir técnicas antisépticas en el quirófano (lo que también podría explicar su extraordinario porcentaje de éxitos).

En 1851, mientras estudiaba en Göttingen, Billroth marchó a Trieste para investigar el sistema nervioso de la raya eléctrica con un compañero de medicina, Georg Meissner. Dos años más tarde Meissner se trasladó a Munich, al laboratorio de investigación de Justus von Liebig (quien más o menos inventó el laboratorio de investigación). Liebig es la persona a quien más desearán odiar los partidarios de los alimentos ecológicos, porque en 1840 se le ocurrió la idea del abono industrial. La clave estaba en compensar químicamente los nutrientes no suplidos por el agua de lluvia o la atmósfera. Este fue un planteamiento sorprendente, porque en esa época se creía radicalmente que todo el alimento de las plantas les llegaba por las raíces.

En 1847 la obra de Liebig sobre química agrícola (una nueva voz en ciencia) iba por la sexta edición y cambiaba el aspecto del campo. A la larga, el abono incrementaría el rendimiento de las cosechas de forma sustancial e, imagino, colaboró a desautorizar la tesis maltusiana contemporánea de que mientras la población crecía de forma geométrica, la producción de alimentos lo hacía en proporción aritmética, por lo que estábamos abocados a la hambruna. De resultas, Liebig probablemente salvó a millones de ciudadanos de la inanición en la época de la Revolución Industrial y, al salvarles la vida, los mantuvo productivos y mejoró la economía. No es de extrañar, pues, que las tesis de Liebig cuajaran en Inglaterra, la nación más industrializada de su tiempo. Su traductor allí fue un viejo alumno suyo, Lyon Playfair. Un hombre que en una pomposa época de grandilocuencia, tenía más que la parte que en justicia le tocaba. Tampoco resulta extraño que fuera uno de los primeros científicos con responsabilidades de gobierno.

Playfair volvió del laboratorio de Liebig para ser alguien en química, portavoz en la Cámara de los Comunes, consejero del príncipe consorte, administrador *general* de correos y otros puestos demasiado estériles para mencionarlos. Pero uno de ellos no lo era tanto. Playfair formó parte de un comité cuyo informe sobre las condiciones de la vida en las ciudades (harto “malas” según relataba: 10 individuos por cama, hundidos hasta los tobillos en aguas residuales, sueldos de hambre, prostitución infantil generalizada, mortandad precoz de la juventud laboral, incesto rampante, familias en harapos, etc.) convulsionó a los complacientes victorianos al darse cuenta de que se encontraban al borde de una revolución si no se aprestaban a hacer algo. Presidió el comité Edwin Chadwick, higienista y reformador social. Y la causa inmediata de toda la angustia era el cólera, enseñoreándose de las ciudades y matando a miles de personas (no podía esperarse otra cosa, dadas las condiciones).

William Farr fue compañero de trabajo de Chadwick. Aquél trituró las cifras, y una de sus muchas teorías de por qué el có-

lera atacaba donde lo hacía (advirtió, por ejemplo, lo recomendable que resultaba vivir alejado de la línea imaginaria que comunica Brighton y Liverpool) era que la transmisión tenía algo que ver con las aguas sucias, lo que resultó correcto.

Por ironía de las cosas, el agua se reputó una cura (para el cólera y cualquier otro mal) cuando la aplicaba de forma externa un alemán de nombre Priessnitz, quien, en su hidrocentro de Grafenberg, envolvió a los hipocondríacos en sábanas frías empapadas, los regaba y los hacía sentarse sobre agua helada, comer horribles alimentos y escuchar la música que tocaba una banda estridente. Realmente no podía fallar. Dos médicos británicos, James Wilson y James Gully, que buscaron tratamiento (Wilson bebió 3500 vasos de agua durante su estancia), levantaron su propio balneario a su regreso en Malvern, Inglaterra, e iniciaron la moda de chapotear con el rocío de la mañana, chorros en las rodillas, abluciones en la cabeza y otros asuntos dudosos. Y le salió bastante bien

Priessnitz envolvió a los hipocondríacos en sábanas frías empapadas y los hacía sentarse sobre agua helada

con lumbreras como Charles Dickens y la famosa enfermera Florence Nightingale. Y Alfred Lord Tennyson, poeta laureado, cuyos poemas históricos, repletos de caballeros en bruñidas armaduras que cruzaban sus lanzas para goce de doncellas tocadas, eran pura fanfarria.

Por cierto, fue Tennyson a quien Thomas Edison envió uno de sus primeros fonógrafos, con el fin de que el gran garabateador inglés recitara sus melancólicos versos a través del cuerno al cilindro rotante de cera y de paso echarle una mano a la difusión del invento de Edison. Lo que, según parece, él no hizo. El honor correspondería a otro producto del sueño americano (inmigrante, mozo de almacén, mancebo para todo, limpiador de botellas, inventor y millonario, por este orden). Porque el genio en cuestión acertó a ver, en un museo de Washington, D.C., un artilugio fuera de uso inventado por un francés, Léon Scott Martinville: una cerda, unida a una membrana en el delgado extremo de un cuerno, que trazaba una línea sinuosa en el hollín esparcido en una hoja de papel, cuando la membrana vibraba en respuesta a una voz.

Saben de qué hablo, ¿no? Todo lo que Emil Berliner tenía que hacer era grabar la línea sinuosa en metal y fabricar copias en discos de laca, y bingo —ya tenemos la grabación para gramófono y la compañía Berliner constituida, la U.S. Gramophone Company. Que en realidad despegó en 1902, cuando el joven a quien Berliner había robado a la compañía discográfica de Edison, Fred Gaisberg, estaba en Milán y convenció a un cantante local de que realizara una grabación. De resultas, sabemos que Caruso fue una de las primeras estrellas de las grabaciones.

Pero seguimos sin saber si cantaba en la ducha.

LIBROS

Ciencia renacentista

Entre la cábala y la técnica

LE ORIGINI DELLA MODERNITÀ, I-II. Edición preparada por Walter Tega. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1998-1999. **JOHANNES REUCHLIN BRIEFWECHSEL 1 (1477-1505).** Edición preparada por Mathias Dall' Asta y Gerald Dörner, con la colaboración de Stefan Rhein. Frommann-Holzbog. Stuttgart-Bad Cannstatt, 1999. **JOHANNES REUCHLIN. SÄMTLICHE WERKE, IV.** 1. Edición preparada por Widu-Wolfgang Ehlers, Hans-Gert Roloff y Peter Schäfer. Frommann-Holzbog. Stuttgart-Bad Cannstatt, 1999.

BOOKS OF THE BODY, por Andrea Carlino. The University of Chicago Press; Chicago, 1999. **PFLANZENABBILDUNGEN IN ALTEN KRÄUTERBÜCHERN. DIE UMBELLIFEREN IN DER HERBARIEN- UND KRÄUTERBUCHLITERATUR DER FRÜHEN NEUZEIT,** por Susanne Baumann. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart, 1998.

JOHN DEE'S CONVERSATIONS WITH ANGELS. CABALA, ALCHEMY, AND THE END OF NATURE, por Debora E. Harkness. Cambridge University Press; Cambridge, 1999.

ON TYCHO'S ISLAND. TYCHO BRAHE AND HIS ASSISTANTS, 1570-1601, por John Robert Christianson. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **NICOLAUS REIMERS (RAIMARUS URSUS),** Dieter Launert. Institüt für Geschichte der Naturwissenschaften; Munich, 1999.

GIAMBATTISTA ALEOTTI E GLI INGEGNERI DEL RINASCIMENTO. Dirigido por Alessandra Fiocca. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1998.

Si la palabra y la imagen definen una época, nunca mejor predicado que del Renacimiento. De la urdimbre de los lenguajes científicos, matriz generadora y fruto decantado de un universo de ideas efervescente, se ocupan *Le Origini della Modernità*. Por sus páginas pasan la depuración de clásicos redivivos, la gradual matematización del conocimiento y el énfasis en la observación directa "de la hormiga y la hierba", en expresión de Campanella. Pero hubo también, junto a la ciencia exacta y desde el comienzo, una extensión esotérica, la cábala, en la que fue maestro Reuchlin, rescatado con la publicación en curso de sus *Briefwechsel* y *Sämtliche Werke*.

Al cierre del Quattrocento, el análisis de la *Naturalis historia* de Plinio abandera la renovación de la zoología y la botánica. Se trata de una aproximación a menudo bronca y envuelta en polémica. Así el debate áspero entre Niccolò Leoniceno y Pandolfo Collenuccio, excusa para arremeter contra la "barbarie árabe" y reclamar una vuelta a la experiencia. De lejos venía también la búsqueda renacentista del rigor matemático, ansiado por Nicolás de Cusa. Desde la *Docta ignorancia*, juvenil, al *De mathematica perfectione*, obra tardía, la doctrina del Cusano se fue articulando con precisión creciente. Sostenía que la matemática encerraba la noción de verdad, definida por el principio de la razón de igualdad o identidad con respecto a sí misma. Sobre el concepto de razón o proporción fundará su pensamiento filosófico.

Para la mayoría, sin embargo, la matemática seguía siendo disciplina subordinada a la física. Según la teoría aristotélica, el físico entiende de superficies, volúmenes, longitudes y puntos, pero los trata en cuanto son atributos esenciales de los objetos materiales; el matemático, por contra, considera exclusivamente las propiedades cuantitativas, abstrayendo de los cuerpos físicos. Sólo la física estaba, pues, capacitada para captar la estructura profunda del mundo, mientras que la matemática se detenía en lo fenoménico. Así perduraron las cosas hasta la reforma de Cristoforo Clavio, para quien física y matemática constituían dos formas complementarias de abordar un mismo fenómeno. Frente a las opiniones filosóficas proclama la certeza de las demostraciones de los matemáticos.

Más prestigiada que oculta, la corriente cabalista se valió para su sistematización de la alquimia, la numerología y la lengua y literatura hebraicas, en las que fue maestro Johannes Reuchlin, nacido a mediados del siglo XV. Estudia en las universidades de Friburgo y La Sorbona Se licencia en derecho, que le abrió la puerta para su posterior carrera administrativa. En Roma aprende griego con Johannes Argyropulos. De su relación con Ermolao Barbaro y otros humanistas italianos tenemos amplias referencias en su Epistolario. Leemos en éste una carta del mayor interés para adentrarnos en los usos culturales de los años iniciales del XVI; me refiero a la que le remite Aldo Manuzio. El impresor veneciano le da cuenta del envío de los libros solicitados, en su mayoría de carácter filológico, aunque no faltan los de filosofía, ciencia, teología e historia, en griego, latín o hebreo. Es decir, los que correspondían a una figura arquetípica del Renacimiento.

De todo su saber, y de su influencia política, tuvo Reuchlin que echar mano para defenderse contra los profesores de la Universidad de Colonia, quienes le recriminaron su ligereza interpretativa de los textos judaicos. A ello dedica este volumen de sus obras completas, que refleja paradigmáticamente la diatriba renacentista. Primero, un largo muestrario histórico de autores injustamente vejados, luego argumentos *ad hominem* sobre la escasa capacidad intelectual y baja calidad moral del contrincante, exposición favorable de la cuestión disputada y apelación a la autoridad real para su defensa.

No era puro azar que la introducción de la cátedra de anatomía en la universidad renacentista llevara aparejada en numerosas ocasiones la de simples, de botánica médica. Ambas trascendían en parte la teoría de los humores, quicio del galenismo dominante, para inserirse en el ámbito más amplio de la filosofía natural. Dependían de la disección y observación y plasmaban sus resultados en láminas espléndidas. Lo comprobamos en *Books of the Body* y en *Pflanzenabbildungen in alten Kräuterbüchern*. Mas, por culpa de la inercia de la enseñanza, muchos anatomistas del Renacimiento se aferraron a doctrinas del pasado desmentidas por sus propias disecciones. Carlino explora la naturaleza y las causas de esa rémora.

La disección anatómica se venía practicando de forma esporádica desde



Il tavolo anatomico di John Bannister (siglo XVI)

finales del siglo XIII. En las universidades se impuso poco a poco la *anatomia publica*, anual, de cadáveres de sentenciados. Las disecciones, realizadas por barberos o cirujanos, cumplían un escueto fin didáctico, para reforzar visualmente la lección aprendida de memoria. Galeno había dicho que la anatomía servía más para el filósofo natural que para el médico, en particular para el clínico. No la veía él como instrumento para salvar vidas humanas. Por supuesto, un conocimiento de la miología, de la osteología y del curso de las venas y principales arterias resultaba indispensable para el cirujano. Pero, ¿cuál era la inmediata utilidad para la etiología, el pronóstico, el diagnóstico y la terapia?

La lección de anatomía comenzó a aparecer en la portada de las obras médicas, fenómeno sin precedentes en la tradición manuscrita. Una de las pioneras fue la del *Fasciculus Medicinae* de John de Ketham, colección de textos médicos impresos en 1491 que sirvió de manual para alumnos de medicina, barberos y cirujanos hasta mediados del siglo XVI. La edición véneta de 1493 se abre con una sesión de disección ante los discentes. En primer plano, el cuerpo de un joven presto a ser diseccionado. Al pie de la mesa, un cesto para recoger los detritus de la operación, que serán enterrados con el resto del cuerpo. En el centro, cuchillo en mano, está el *sector*, ejecutor de la disección. A la derecha, con el puntero un *demonstrator* u *ostensor* le indica al *sector* por dónde debe cortar de acuerdo con lo que está recitando el *lector* desde un púlpito, y que serían pasajes extraídos del *Canon* de Avicena, del *De usu partium corporis humani* de Galeno o de la *Anatomia* de Mondino. A ese método de enseñanza de la anatomía se le conoce por quodlibetano.

Hasta que, en 1543 Andreas Vesalio publicó su *De humana corporis fabrica libri septem*. Proponía en ella, avalado por sus propias disecciones, una revisión a fondo de la morfología humana descrita en los libros clásicos. Además de enmendar errores de la anatomía galénica, instauraba un nuevo método de estudio, fuera de los libros. En ese yunque, también debía acrisolarse la verdad de las doctrinas transmitidas. Si las viejas representaciones iconográficas de la lección de anatomía mostraban que la disección se practicaba como observación subordinada a la descripción, Vesalio proclamará que era el cuerpo el que debía dictar el texto.

Con la recuperación de Dioscórides y la práctica de la herborización, los botánicos comenzaron a agrupar las especies que portaban umbela. Hicieron lo propio con las que producían conos. Sobre las primeras preparó su tesis de grado Susanne Baumann, refundida en *Pflanzenabbildungen in alten Kräuterbüchern. Die Umbelliferen in der Herbarien- und Kräuterbuchliteratur der frühen Neuzeit*. Las Umbelíferas conforman hoy una familia constituida por unos 300 géneros con 2500 o 3000 especies, de amplísima distribución geográfica. Pero los libros renacentistas sólo re-



Tycho Brahe en Kronborg, por Hans Knieper

señaron algo más de un centenar, las apreciadas por su uso en medicina o dieta.

El herbario más famoso del XVI es el "Manuscrito de Viena" de Leonhart Fuchs, autor de dos magnas obras impresas, *De historia stirpium* y *New Kreüterbuch*. Consta el manuscrito de tres partes, de 1538, 1624 y 1380 páginas, respectivamente, con un tercio de acuarelas de 315 por 200 mm. Fuchs intervino personalmente en las ilustraciones. Redactado en latín, describe, según modelo canónico de la época, los "Nomina", "Genera", "Forma", "Tempus", "Locus", "Temperamenta" y "Vires". Son plantas por él recolectadas o enviadas por sus amigos, una costumbre que ha comenzado a extenderse. Así, por ejemplo, *Bunium bulbocastanum* la recibió del botánico inglés formado en Italia William Turner. El manuscrito compila 86 representaciones de Umbelíferas. Hasta 63 acuarelas de esa familia encontramos en el manuscrito o "Libri picturati" de Charles de L'Escluse; entre ellas figura *Eryngium amethystinum*, que se llevó de su viaje por España.

En muchos casos, pensemos en Cesalpino, los herbarios confeccionados servían de plantilla para su posterior tratado impreso. No se olvide que estamos en la centuria de oro de la botánica. La primera parte del *Herbarum vive eicones* de Otto Brunfels, punto de partida de la botánica renacentista exagerado en su importancia real por la historiografía germana, apareció en 1530. Se representan en ese tomo las umbelíferas *Sanicula europaea* y *Coriandrum sativum*, aunque muy pronto se añaden más en la versión alemana. En enero de 1533 se publica en Frankfurt la primera edición del *Libro de las plantas* de Rösslin, con trece representaciones de umbelíferas, tomadas algunas de otras obras impresas, práctica que se hará bastante común. En particular a raíz de la aparición del *De historia stirpium* de Fuchs. De cuyos grabados se aprovecharon Turner, Mattioli y Daléchamps.

Turner se esforzó por llevar a las islas el espíritu del Renacimiento protestante. Pero el impulso mayor lo dio un galés seguidor de Reuchlin, cuya biografía cabalística nos ofrece Debora E. Harkness en *John Dee's Conversations with Angels. Cabala, Alchemy, and the End of Nature*, que

Medicina española

DICCIONARIO ESPASA MEDICINA. Facultad de Medicina, Universidad de Navarra. Editorial Espasa-Calpe, S.A.; Madrid, 1999.

En la cultura actual es llamativa la importancia que otorgan los medios de comunicación a la información médica. El tiempo dedicado en los telediarios a la salud, la existencia de suplementos monográficos en la prensa escrita, y la publicación de abundantes libros sobre la salud y la enfermedad subrayan una *medicalización* creciente de la sociedad. Es verdad que la influencia de la técnica y de las ciencias en general condiciona muchos aspectos de nuestra vida, pero ninguna de las otras ciencias alcanza el nivel del protagonismo otorgado a la salud, a la prevención de la enfermedad, a su conocimiento exhaustivo y a sus variados tratamientos.

Hay un mayor deseo de saber "de medicina" que el que parecen haber experimentado otras generaciones. Interés que como en los tiempos de Molière, sigue tropezando con la dificultad de entender las palabras que expresan, conceptos y técnicas relacionados con la salud. Esos términos tienen su origen mayoritariamente en lenguas que resultan cada vez más lejanas al lector: el griego y el latín.

Uno de los efectos perversos de la tan traída crisis de las humanidades es la dificultad que experimentan los alumnos de medicina para adquirir el vocabulario necesario para entender los conceptos específicos de la ciencia y la práctica médicas. A esto se une la velocidad con que se necesita generar nuevas palabras que designen las técnicas y conocimientos recientemente aportados, muchos de ellos trasvasados de otras lenguas, fundamentalmente el inglés. Si eso sucede con los que están profesionalmente involucrados en un proceso formativo tan absorbente como es el de la medicina, ¿qué pasará con el público general?

Por eso hay que saludar la aparición de un nuevo diccionario de medicina, publicado por Espasa en su colección Diccionarios. Más de treinta profesores de la facultad de medicina y especialistas de la Clínica Universitaria de la Universidad de Navarra, coordinados por Luis María Gonzalo, catedrático de anatomía, han

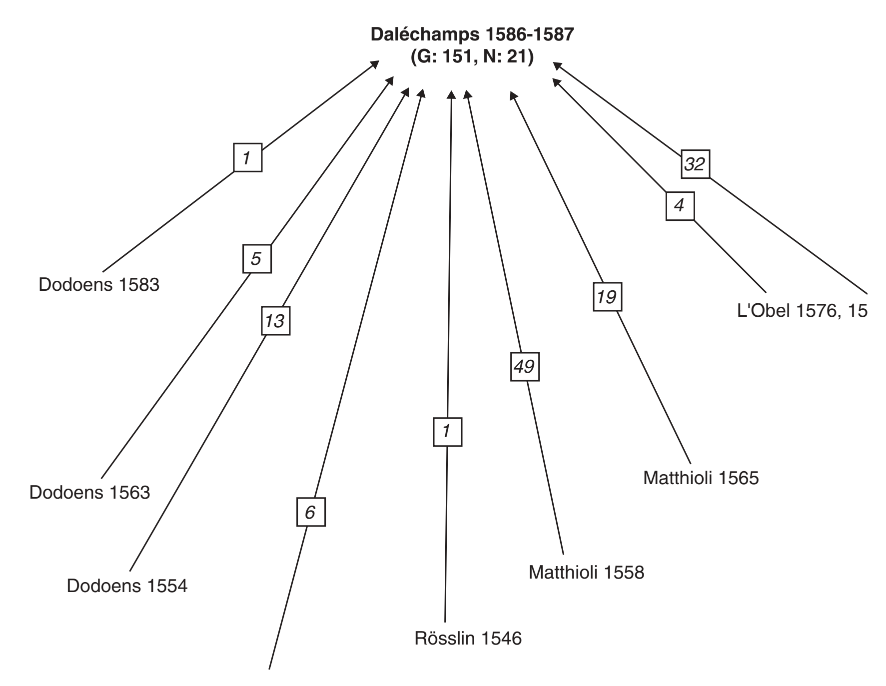
resbala más de una vez cuando se aparta del guión. Con este mago matemático, la obra de Euclides prende en la Inglaterra isabelina, a la que ilustra, además, en astronomía, óptica, arte de la navegación, mecánica, astrología, alquimia y cábala. En su *Monas Hieroglyphica,* de 1564, articula la matemática por teoremas. Para Dee, el pensamiento euclídeo debe considerarse desde un punto de vista matemático, vinculado con propiedades geométricas simples, desde un punto de vista físico, referido a sus aplicaciones prácticas, y desde un punto de vista de la especulación filosófica.

Sus "conversaciones" con los ángeles a través de una bola de cristal habían venido desconcertando a los estudiosos de la ciencia moderna, que recelaban incluirlas en el contexto de la filosofía de una de las mentes matemáticas más vigorosas de la época. Prejuicio del que se sintió libre Harkness y las ha rastreado en las notas marginales de los libros de la biblioteca de Dee (la más rica del Renacimiento según Yates) y los diarios manuscritos, para llegar al convencimiento de que representan el desarrollo pleno de su visión del mundo, que se resume en su voluntad de restaurar el libro degenerado de la naturaleza.

La bola constituía para Dee un espacio sacro capaz de representar el mundo en miniatura; además, se asociaba al matraz cerrado de los experimentos alquímicos. A la bola había que agregar el "sello de Dios", cuyo nombre hebreo, *Emeth*, significaba la verdad. Era uno de los 72 nombres de Dios en la tradición cabalística. A través de las conversaciones, Dee buscaba establecer un puente entre lo humano y lo divino. Y ello a través del lenguaje cifrado, que en él tenía vigor creador.

Dee recaló en Praga, donde la ciencia renacentista buscaba el mecenazgo de Rodolfo II. Allí se evitaron Ursus y Tycho Brahe; éste odiaba al germano con no menor intensidad con que simpatizaba con el galés. *Nicolaus Reimers (Raimarus Ursus): Günstling Rantzaus-Brahes Feind: Leben und Werk* se propone vindicar la fama de uno de los personajes más estigmatizados de la historia de la astronomía. Nicolaus Remers, latinizado Raimarus Ursus, nació en Hennstedt en 1551. De joven fue porquero y no asistió nunca a ninguna escuela de gramática. A los 18 años empezó a aprender a leer y escribir, a estudiar latín y griego. En 1574 entró al servicio de Heinrich Rantzau, quien sufragó sus dos primeros escritos, el *Manual de gramática latina* y la *Geodesia*. En el primero sigue la tradición de Donat o Melanchthon a propósito de las conjugaciones de verbos, pero ordenó las declinaciones latinas de acuerdo con el número de sílabas, determinado a partir del núcleo de la palabra. Se ocupa en la *Geodesia* de geometría y topografía elementales. Cuando, años después, conozca a Jost Bürgi, aprenderá álgebra y trigonometría en profundidad, incluido su método de cálculo de las tablas de senos. En correspondencia, Ursus le tradujo al alemán el *De revolutionibus* de Copérnico. De paso, ponía las bases del lenguaje científico vernáculo, ceñido hasta entonces a la medicina y la botánica.

En septiembre de 1584, visitó Uraniborg, la ciudad de la ciencia levantada por Tycho. Pero éste le desdeñó. Novela John Robert Christianson en *On Tycho's Island* la historia de esa estancia tan controvertida. Cierto es que, muy pronto, Ursus pergeña su modelo del mundo, convergente con el de Brahe, si no plagiado, y lo difunde. Sostenía que el universo y el número de estrellas



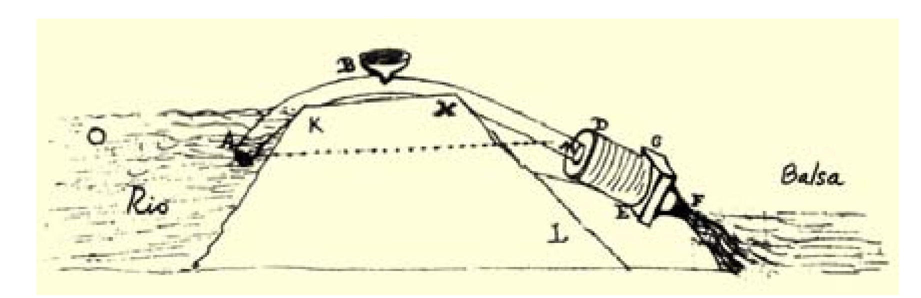
Procedencia de las especies de Umbelíferas descritas por Daléchamps

sido los autores de esta obra que cuenta con más de 18.000 entradas. Se ha dado cabida a términos relacionados con la biología molecular, la genética y la bioquímica, áreas cada vez más importantes en la ciencia médica. También es de agradecer el amplio número de voces dedicadas a la ética médica, pues esta disciplina goza cada vez de más peso y serán muchas las consultas que se dirijan hacia los términos que aclaran esos conceptos.

La patología más prevalente en los diccionarios es la imitación: se repiten aunque digan que se renuevan. Por otra parte la mayoría de los diccionarios médicos que se encuentran en el mercado español son traducciones de obras redactadas en otras lenguas. En este caso no sucede así y de ahí el servicio que este diccionario podrá prestar. No sólo lo hará al conocimiento de la medicina sino que también servirá a la lengua española y eso se debe a la claridad expositiva que adoptan los autores. La existencia de un rico material iconográfico a todo color completa la información y aligera el texto.

En los diccionarios no cabe elogiar o criticar la presencia o ausencia de determinadas voces. Pero desconcierta el criterio seguido para la inclusión de referencias a personajes del pasado médico. Aparte de los epónimos usados en la medicina actual, existen entradas para algunas figuras y es en ésas donde se aprecian ausencias llamativas. Quizá, como sucede tantas veces: son todos los que están, pero no están todos los que son.

PEDRO LUIS GIL SOTRES



Aplicación del sifón al problema de abastecimiento de agua de una balsa. (Hidrologia overo Raggionamento della scienza et arte dell'acque.) *Dibujo original de Aleotti*

fijas eran infinitos y atribuía el brillo variable de las últimas a sus diferentes distancias de la Tierra. Se hallaba ésta instalada en el centro del cosmos y giraba diariamente en torno a su eje. El Sol, a cuyo alrededor giraban todos los demás planetas, orbitaba alrededor de la Tierra.

Fructíferos fueron los años en Estrasburgo, desde 1587 hasta 1591, dedicado a la enseñanza y a la publicación. En ese intervalo aparecieron su obra principal, *Fundamentum astronomicum,* y *Metamorphosis Logicae*. Invitado por Rodolfo II se convierte en matemático real de la corte de Praga en 1591, cargo que llevaba aparejado trabajar en astrología, además de una plaza de enseñante en la universidad de la ciudad. Terminó su *Chronotheatron* en 1597, en que aparecieron también sus *Hipótesis astronómicas*, una réplica a las acusaciones de robo que le había lanzado Tycho Brahe desde *Cartas astronómicas*.

Con los años crece la figura poliédrica de Brahe. Igual que otros jóvenes de la nobleza, había aprendido latín en su adolescencia, estudiado luego en la Universidad de Copenhague y visitado otros centros europeos. A su vuelta, ocho años después, se estableció con un tío suyo en lo que fuera abadía de Herrevad, donde, entre otros servicios construyeron un observatorio, un germen de lo que sería Uraniborg. Allí vio Tycho la famosa supernova de 1572 en la constelación de Casiopea, de importancia clave en la historia de la ciencia porque demostraba, sobre base empírica, que se producían cambios en las regiones celestes, igual que en la Tierra. Se desmoronaba un axioma fundamental de la cosmología aristotélica, a saber, la inmutabilidad del firmamento.

Químico paracelsista, astrónomo especulativo y, a la par, observador riguroso. Y, sobre todo, constructor de Uraniborg, biblioteca, laboratorio, observatorio, taller cartográfico, molino de papel e imprenta, una ciudadela al servicio de la ciencia con jardines medicinales incluidos. Bajo su dirección, el equipo allí congregado logró, entre 1576 y 1597, hitos en astronomía, método científico y organización de la investigación que resultaron esenciales para el nacimiento de la ciencia moderna. Uraniborg pulimentaba sus espejos y creaba sus propios cuadrantes, sextantes o esferas. En 1580 llegó allí Paul Wittich, recomendado por Thadeus Hagecius. Reveló a Tycho sus innovaciones matemáticas y, a la recíproca, aprendió de éste métodos de observación. A finales de 1582 los astrónomos de Uraniborg concentraron sus observaciones en la actividad de Marte, planeta que en el sistema copernicano se halla más cerca de la Tierra que del Sol, no así en el sistema ptolemaico. En mayo de 1584, Tycho dispuso que Elias Olsen Morsing viajara a Danzig para determinar la latitud exacta de las observaciones de Copérnico en Frauenburg.

Mientras tanto, daba los últimos retoques a su obra maestra *De mundi aetherei recentioribus phaenomenis*. El primer volumen trataría de la nueva estrella de 1572, el segundo del cometa de 1577 y el tercero de cometas posteriores, que debían acabar con la cosmología aristotélica. Con las pruebas que iba obteniendo forjaba una nueva astronomía, en la que todos los planetas giraban alrededor del Sol, que a su vez lo hacía en torno a la Tierra. Las órbitas del Sol y la de Marte se cortaban, lo que Tycho atribuía a que las órbitas celestes eran geométricas e inmateriales, no esferas cristalinas. Los cometas procedían en torno al Sol con una velocidad irregular, en dirección opuesta de los planetas, describiendo una órbita oval. Tycho se quedó de piedra cuando se enteró de que Ursus había defendido un sistema muy similar y que Bürgi había creado un modelo horológico del mismo.

Desde la segunda mitad del siglo XVI, la ingeniería y arquitectura italianas no conocían par, porque en ningún otro lugar se cultivaba la matemática como en la península. Esa era la conclusión extraída por el coetáneo Pierre de la Ramée y fundamentada ahora en *Giambattista Aleotti e gli Ingegneri del Rinascimento*. Girolamo Cardano, Niccolò Tartaglia y Ludovico Ferrari habían dado nuevo vigor a la aritmética y al álgebra con la resolución de las ecuaciones generales de tercer y cuarto grado. En el *Algebra* de Raffaele Bombelli se ofrecía el primer uso de números complejos.

Los tratados matemáticos contemplaban también la astronomía, la óptica, la cartografía, el estudio de las fortificaciones, el arte de la artillería, la hidráulica, la geografía y la arquitectura civil. No había escuelas técnicas —un fenómeno muy posterior— y el arte se aprendía en los libros y a pie de obra. Si las bibliotecas de los ingenieros y arquitectos de un siglo antes (Leonardo da Vinci) apenas sumaban una cincuentena de volúmenes, la de Aleotti almacenaba varios centenares. También la calidad de las ediciones era mejor. Desde Urbino, Federico Commandino hacía accesible la matemática griega de Euclides, Apolonio, Arquímedes o Ptolomeo. Tradujo también al latín la *Pneumática* de Herón de Alejandría, vertida de éste al italiano por Aleotti con el título de *Gli artifitiosi et curiosi moti spiritali di Herrone*.

Añadió a la traducción vernácula cuatro teoremas de su invención, aplicados a la elevación de las aguas. Aleotti anunciaba allí su idea de escribir un "teatro de todas las ciencias y artes", primer boceto de la *Hidrologia overo Raggionamento della scienza et arte dell'acque*, que permaneció inédita. Los dos libros centrales de la *Hidrologia*, el II y el III, abordan los problemas principales de la ingeniería hidráulica: el de la regulación de los ríos y el de la construcción de canales para suplir la acción de la naturaleza, con sus puentes, bombas hidráulicas y sistemas varios de elevación. Cuando Ferrara pasó a dominio papal, se le encargan a Aleotti los proyectos de la iglesia de san Carlos, el campanario de S. Benito y la tumba de Ariosto. Pero labró su fama en la cartografía y, sobre todo, en las obras hidráulicas, en particular con su acertada aplicación del sifón, o caña doblada.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



PLANETAS EN MINIATURA, por Erik Asphaug

Los asteroides han cobrado notoriedad por el peligro potencial que encierran. Pero ofrecen también otra cara más amable. Portan la clave del origen de los planetas.

LA CRISIS DE LAS MEMORIAS MAGNETICAS, por Jon William Toigo

La industria de los discos magnéticos se acerca velozmente a una barrera física: el efecto superparamagnético. Serán necesarias sagaces innovaciones para poder superarla.

METALIZAR EL HIDROGENO, por William J. Nellis

Tras un largo y laborioso proceso, en el que se han reproducido condiciones tan extremas como las que existen en el núcleo de Júpiter, por fin se ha logrado convertir en metal el hidrógeno.

LLUVIA Y BOSQUE MEDITERRANEO, por Juan F. Gallardo Lancho, M. Amparo Vicente y Gerardo Moreno

El agua de lluvia incidente en un ecosistema cambia de composición y volumen hasta reaparecer en superficie, tras su paso por el suelo.

LAS TINTURAS NATURALES, por Dominique Cardon

Después de haber sido sustituidas por los colorantes artificiales durante un siglo, las tinturas naturales despiertan nuevamente el interés de industriales, químicos y arqueólogos.

EXPERIMENTOS HISTORICOS EN EL BANCO DE PRUEBAS, por Peter Heering, Falk Riess y Christian Sichau

Quien intente reproducir experimentos significativos en su contexto histórico —se trate de hilar seda o de ejercitar los músculos con una bomba manual— se encontrará con varias sorpresas.

ANTE LA AVALANCHA POBLACIONAL, por Frans B. M. de Waal, Filippo Aureli y Peter G. Judge

Suele afirmarse que la densidad desmesurada de población engendra violencia. Aunque podría ser cierto de los roedores, los humanos y otros primates tienen especiales comportamientos que les facilita la convivencia cuando escasea el espacio.

LA PLATA DEL ANTIGUO PERU, por Alain Gioda y Carlos Serrano

Entre 1590 y 1600 Potosí produjo ¡más del 40 por ciento de la plata mundial! Una red de lagunas y de abastecimiento de agua, construida por los españoles, proporcionó la energía hidráulica necesaria para el tratamiento de los minerales de plata.

